

车-路协同下路面状态感知技术发展现状与展望

马涛,王仁智,陈丰*,宋一涛,李岳,马源

(东南大学交通学院,江苏南京 211189)



马涛:教授,博士生导师,博士。东南大学青年首席教授,交通学院院长兼道路工程系主任,国家万人计划领军人才、国家优青,智慧公路运维技术研究团队负责人。担任新型道路材料国家工程中心副主任、道路基础设施长效服役与安全江苏省重点实验室主任,打造了智慧公路运维技术研究团队;主持/参与国家重点研发计划、国家863计划、国家科技支撑计划、国家重大科学仪器研发、国家自然科学基金等重要科研课题50余项,多个成果评价达到国际先进或领先水平;发表学术论文200余篇(其中第一作者/通信作者SCI论文100余篇),连续入选全球前2%顶尖科学家、中国高被引学者;授权国家发明专利80余项、软件著作权20余项,出版专著10部,参编行/地/团标10余部。

摘要:综述车路协同感知路面技术体系功能框架与物理架构并展望未来发展方向。基于基础设施的基本要求,系统描绘车路协同路面的功能框架,提出行驶安全辅助、导航路径规划、材料结构优化、智能养护决策4个具体功能;根据实现功能的数据类型需求,阐明涵盖状态感知、数据处理、数据传输、数据融合和能量供给等5个组成核心的技术体系架构。研究梳理该技术体系中关键的状态感知和数据分析技术,阐释相关技术原理、性能特点以及存在的问题,提出技术整体发展需求。综合功能框架技术需求,规划现有技术融合升级和新技术方向开辟2种途径,指明车路协同路面的未来发展方向。展望车路协同路面与其他智慧道路技术如无人驾驶路面、自愈合路面、自俘能路面等的有机融合,以实现车路协同路面的使用效能最大化,并助力未来智慧道路基础设施不断发展完善。

关键词:道路工程;车路协同;路面状态;传感技术;数据分析方法

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

引用格式:马涛,王仁智,陈丰,等.车-路协同下路面状态感知技术发展现状与展望[J].山东大学学报(工学版),2024,54(5):1-28.

MA Tao, WANG Renzhi, CHEN Feng, et al. Development status and prospects of pavement state sensing technology under vehicle-road interaction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(5):1-28.

Development status and prospects of pavement state sensing technology under vehicle-road interaction

MA Tao, WANG Renzhi, CHEN Feng*, SONG Yitao, LI Yue, MA Yuan

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: This works focuses on the functional framework, technical system, specific technical analysis and future development direction of vehicle-pavement cooperative sensing pavement technology. Based on the basic requirements of infrastructure, the system outlines the functional framework of vehicle-pavement cooperative pavement, proposes four specific functions: driving safety assistance, navigation path planning, material structure optimization, and intelligent maintenance decision-making; according to the data type requirements for achieving the functions, it explains the relevant technical system, including status sensing, data processing, data transmission, data fusion, and energy supply. The most important status perception and data analysis technologies in the technical system are studied and sorted out, the principles, performance characteristics, and existing problems of relevant

收稿日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52208430);江苏省自然科学基金资助项目(BK20210248)

第一作者简介:马涛(1981—),男,江苏徐州人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为智慧公路运维技术。E-mail:matao@seu.edu.cn

*通信作者简介:陈丰(1987—),男,湖北黄冈人,副研究员,博士生导师,博士,主要研究方向为智能道路铺装技术。E-mail:fengc@seu.edu.cn

specific technologies are expounded, and the overall development requirements of the technology are proposed. Based on the technical requirements of the function architecture, two aspects are discussed about: upgrading existing technologies and developing new technological directions, indicating the future development direction of vehicle-pavement cooperative pavement. The study also looks forward to the integration of vehicle-pavement cooperative pavement technology with other intelligent road technologies (such as unmanned driving pavement, self-healing pavement, and self-capture pavement) to maximize the efficiency of vehicle-pavement cooperative pavement use, and to assist the continuous development of future intelligent road infrastructure.

Keywords: road engineering; vehicle-pavement cooperation; pavement condition; sensing technology; data interpretation method

0 引言

通过集成无线通信、智能传感器、人工智能等前沿技术,智慧道路基础设施将实现路网级的全要素感知、全方位服务、全过程管控、全数字运营等,显著提升未来交通运行安全性,并在基础设施延寿、行车舒适性等方面发挥重要作用。自2020年以来,中国政府明确提出,要推进公路感知网络与基础设施的同步规划与建设,实现重点路段的全天候、多要素状态感知,建设集规划设计、监测、管控、应急处理等公路全寿命过程于一体的智慧路网云控平台^[1]。为实现上述规划目标,道路基础设施要能准确、高效地感知自身的实时状态,及时进行评估预测,并根据感知的结果,采取相应的设计、管控和养护措施,提高行车的安全性和舒适性,延长道路基础设施寿命并降低使用成本。作为未来智能道路基础设施的结构主体,公路沥青路面状态感知所需技术种类繁多。目前,感知路面研究主要集中在传感技术和数据分析方法,且大部分都只针对技术自身性能的提升,缺乏系统性。文献[2]对智能路面的架构提出了展望和规划,但对感知路面的描述仅停留在宏观“感知层”层面,对相关重要感知技术性能特点和发展现状的了解亦不够全面,而导致的问题可能包括各技术之间协调性不足、兼容性不佳等。而且,车路协同路面功能集成架构缺乏顶层设计,特别是缺乏各子模块技术一体化协同使用设计的思考,从而导致各子模块技术利用率低和感知路面综合使用效能不足。另外在车路协同背景下,随着自动驾驶技术不断更迭,车辆获取关于路面的信息逐渐增多,充分融合并利用车路多源数据问题急待解决。鉴于以上考虑,本文围绕以下工作重点展开:(1)系统描绘车路协同路面的功能架构和技术体系;(2)全面梳理感知路面最重要的状态感知与数据处理技术,阐明相关技术原理、性能特点以及存在的问题,提出技术整体发展需求;(3)进一步以智慧道路基础设施顶层设计与蓝图,展望车路协

同路面与其他智能道路技术(无人驾驶路面、自愈合路面、自俘能路面等)的有机融合和相关支撑,为实现感知路面技术体系使用效能最大化提出顶层思考。

1 车-路协同感知路面技术体系架构

1.1 车-路协同感知路面技术功能架构

车-路协同感知路面是未来智慧基础设施的重要组成部分,其功能定位应满足以下要求:(1)为设施使用对象提供高水平、低风险服务;(2)实现低成本、长寿命的基础设施全生命周期管理。车路协同感知路面功能架构如图1所示,该架构对应两方面基本要求,一方面,车路协同路面需要为道路行驶车辆提供行驶安全辅助和导航路径规划,保证其在安全的前提下以最高效率和最低成本到达行驶目的地;另一方面,需要提升路面结构性能预测精度,为道路建管部门决策和路面结构-材料一体化设计提供数据支持,实现基础设施使用寿命延长,并降低全寿命周期经济和环境成本。



图1 车路协同感知路面功能架构
Fig.1 Functional architecture of vehicle-road cooperative perception

针对道路行驶车辆的行驶安全辅助和导航路

径规划功能,需要感知路面提供实时和未来的环境状态数据。实时状态由环境状态传感技术采集,并传输到相应的数据终端。经终端决策后,一方面可向当前路段行驶的车辆广播,实现安全辅助功能;另一方面,利用相关数据分析技术,实现对未来环境状态的预测,从而预判该路段未来一段时间内的服务水平,提前决定是否驶入该路段,为车辆提供导航路径规划。针对智能养护决策和材料-结构优化设计功能,需要感知路面提供路面动态结构状态参数,并以此预测结构性能的演变趋势。动态结构状态参数可由埋入式结构传感技术进行感知,并发送到数据平台。一方面道路建管部门可以根据结构的实时数据决定最佳养护方案和时机,防止路面出现大面积病害,降低养护难度和成本;另一方面,大量的结构状态数据可以用于预测结构衰变趋势,为结构性能预测和优化设计提供数据支持。

1.2 车-路协同感知路面技术物理框架

车路协同感知路面一般通过多种传感器件、检测设备状态传感技术实时采集和获取路面的信息,将数据传递给数据终端,并按照设计好的数据处理方法进行预测与预测,完成对路面状态的全方位主动感知和自主辨析,车路协同感知路面技术物理框架如图2所示。车路协同路面的功能实现依赖于状态感知层和数据处理层输出的数据,这两个层面的技术水平关系到感知路面内输出数据的质量,从而进一步影响功能实现能力。因此,车路协同路面的主要技术是状态感知技术和数据处理技术。

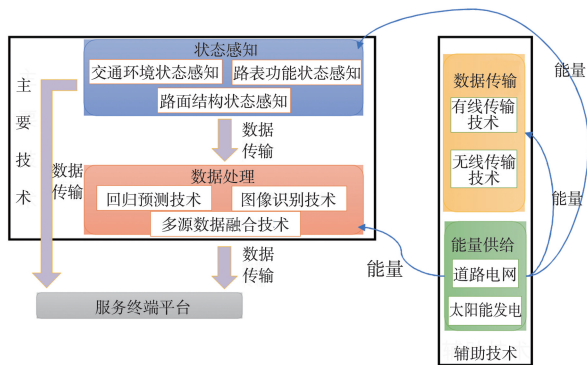


图2 车路协同感知路面技术物理框架

Fig.2 Physics architecture of vehicle-road cooperative perception pavement technology

状态感知层的输出参量通常包括交通环境状态参数(荷载、路面温度、路面气象及凝结物厚度等)、路表功能状态(路面病害、路面抗滑、路面平整度等)以及路面结构状态(力学响应、路基冻胀融沉变形等)。与之对应,状态感知层中的相关技术可

分为交通环境状态传感技术、路表功能状态传感技术、路面结构状态传感技术3类。数据处理层输出的数据服务于道路实时状态评估、未来状态预测以及多模态数据融合处理,主要涉及道路实时图像分类识别、状态数据回归预测、多源数据融合等技术。

车路协同感知路面服务过程是通过路面状态数据传输来实现。为了保证完整的数据传输,一方面需要能满足状态感知层、数据处理层和服务对象之间的快速、准确、高效的数据传输要求;另一方面,路面状态数据从采集到输出的过程中,相应的传感器件、传输装置、服务器等设备还需要能量供给。因此,数据传输技术和能量供给技术是车路协同感知路面技术体系中不可或缺的辅助技术。

2 车路协同感知路面传感技术研究

基于车路协同的路面状态感知需要获取路面环境状态、路表功能状态、结构状态等参量,实时传输至路侧数据单元,一方面向道路行驶车辆广播当前道路环境状态,达到辅助安全驾驶目的;另一方面,感知数据将上载至路网数据平台,用于评估路面实时结构状态和预测未来路面状态演变,进而输出至路网服务终端以实现导航路径规划、智能养护决策等功能。为了保证安全辅助功能全天候不中断,同时真实、高效地反映路面结构状态变化,基于车路协同感知路面的传感技术需要满足长期监测、连续监测、精准监测、全面监测、实时传输等技术要求。车路协同下路面状态感知技术路线如图3。

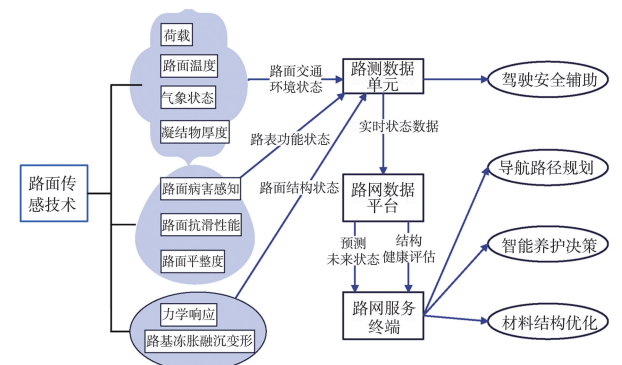


图3 车路协同下路面状态感知技术路线

Fig.3 Road state perception technology route under vehicle-road collaboration

传统路面状态信息的获取主要依赖于道路外部技术手段,例如使用自动弯沉仪等监测路面结构健康程度和损伤情况^[3]。这类技术手段发展时间长,应用比较广泛,但其只能定点表征路面信息,时间连续性较差,并且集成度较低,很难同时获取多

种类的路面信息参量,这与车路协同下感知路面的传感技术要求相悖^[4]。因此,本研究在梳理感知路面状态传感技术时,聚焦部署于路面结构内部(含路侧)的连续感知技术,对当前传感器部署、施工方法以及防护设计现状等进行了分析和总结,并针对当前存在的不足提出了相关改进建议。

2.1 交通环境状态感知

路面交通环境状态作为路面状态感知的重要一环,道路湿滑、车辆超重、路面结冰等交通环境恶劣状况是影响车辆行驶安全的重要因素,及时获取并分析路面交通环境状况,有助于驾驶员做出正确的驾驶决策,避免发生交通事故。

2.1.1 荷载

车辆超重是路面过早损坏的主要原因之一,车辆超重会严重破坏公路设施,增大安全隐患,因此感知路面交通荷载不仅有利于道路结构设计及道路维护,也会有效遏止超重行为的发生。路面交通荷载主要通过路面动态称重系统获取。动态称重系统可以在不中断交通运行的情况下获取经过车辆的轴重等参量,进一步结合交通量记录,可在一定程度上反映道路所受的荷载情况,是未来超载检测的主要方向。根据传感原理的不同,常见的动态称重系统有4种。

(1) 弯板式

弯板式动态称重系统传感器由特殊合金材料制成,内部布置应变片群,其在行车方向的长度一般不小于500 mm。在车辆碾压过弯板时,称重板在受到压力后产生形变,完整记录车轮通过的重量信号,再按照算法得出车辆的重量信息。因为弯板结构简单,无机械结构,因此其抗冲击能力强,称重精度高,可以适应较高的车速,更换和维修较为方便^[5]。但是,如果道路平整度较差且车辆的行驶速度过快,称重板受力不均匀,会产生较大的误差。

(2) 光纤式

当车辆驶过传感器时,压力的改变会引起结构内部温度、压力以及应变的改变,从而使得光纤光栅的反射光谱发生变化,分析反射谱即可得到路面所受压力的动态值^[6-8]。光纤传感器灵敏度高,体积小,可靠性高,但成本略高,用作动态称重系统,长期承受荷载可能使路面结构发生破坏。

(3) 电容式

常见的电容式动态称重系统的传感器由3层导电层和2层绝缘层组成,这5层构成了2个电容器。当车辆驶过时,绝缘层产生形变,电容极板(导电

层)之间的距离减小,电容增大,通过电容变化反算得到压力^[9]。导电层一般采用导电布材料,绝缘层一般采用柔韧性较好的硅橡胶材料^[10-11],导电布材料和硅橡胶材料可以减轻称重系统的质量,并且得益于橡胶的柔软性和高内阻,能够降低系统对路面平整度的要求,从而减少了动态数据所受的干扰。但是,由于橡胶绝缘层易老化,该类传感器的耐久性不高。

(4) 压电式

利用纵向压电效应,将质量信号转化为电信号,传感器的体积通常较小,车轮与传感器接触时间短,不能表征出完整的质量信号,因此常通过积分累加得到车辆重量信息^[12-14]。按照材质和受力传导方式的不同,可以分为压电石英式、压电陶瓷式以及压电薄膜式等^[15-16]。压电式动态称重系统成本低,对高速的适应性好,但精度不高,结构复杂,维修更换程序复杂,寿命不长。

当前动态称重系统测得的轴重结果均有较高的精度和准确率,但仍存在数据传输效率差、成本高、测量稳定性不足等问题。未来的道路称重系统将综合各种类型的称重传感器,发挥各自优势,减少运营维护成本,提高称重效率。因此基于车路协同的动态荷载感知技术主要还应在提高系统稳定性、优化传感器数量和布设方法、降低施工和使用成本、最大限度提高测量精度以及增强系统智能化及自动化能力等方面优化,综合应用称重系统。

2.1.2 路面温度感知

路面温度是影响交通安全和结构安全的重要因素之一。路面温度过高时,易产生车辙、泛油等路面病害,亦会诱发车辆爆胎;路面温度过低时,会导致路面结冰,明显削弱抗滑性能,同时也会导致低温开裂等路面病害。提升路面温度实时感知与处理能力,对实现车-路协同下的交通主动管控与道路主动运维决策具有重要意义。目前,路面温度感知按照技术原理主要有4类传感技术。

(1) 电学式温度传感

传统路面温度监测手段是在道路内部埋设温度传感器,其中较为常见的有热电偶、热敏电阻、电阻温度检测器(resistance temperature detector, RTD)和IC温度传感器等^[17],传统的电学式温度传感器通过导体或者半导体器件,将温度信号转化为电信号,并传输给数据平台,再翻译成路面温度数据^[18-19]。此类传感器成本低,抗干扰能力也比较强,测量精度比较高,但是监测范围有限,对于绵延数十公里的公路,布设有限数目的传感器不能对路

面的整体温度场形成准确有效的监测。

(2) 红外测温设备

近年来,研究人员尝试将红外测温设备应用于路面温度监测中。部署在路侧的红外测温设备,利用物体红外辐射量和波长分布与表面温度成正比的物理特性,通过测量路表红外辐射指标获得温度数据^[20-21]。文献[22]采用红外热成像仪对沥青路面进行温度监控,克服了使用传统埋入式温度传感器的随意性和偶然性。虽然红外测温设备的监测范围相较于传统温度传感器有所扩大,但其造价高昂,有效监测公路整体温度场的布设成本高,难以推广。

(3) 卫星反演地表温度

随着卫星遥感技术的进步,国内外专家将红外辐射测量与卫星遥感技术进行结合,研制了气象卫星反演地表温度的监测技术。其基本原理是利用中红外、热红外和微波遥感数据,结合地-气辐射方程反向推算地表温度^[23]。该技术测量精度与大气校正、地表发射率特性和传感器性能有关。其中,地表发射率特性对精度的影响最大^[24-26]。根据路面的陆表发射率特征,文献[27]利用 TES 算法分析了 ASTER 影像数据,发现了道路密度和平均温度呈正相关关系;文献[28]提取了沥青路面、混凝土路面、植被和水体的低空红外遥感图像,得出沥青路面具有独特的地表发射率特性。在此基础上,文献[29]对卫星反演地表温度产品在路面测温中的适用性和使用方法进行了研究,使用 FY-2G 和 Himawari-8 卫星反演地表温度的方法,建立了温度订正模型并结合历史数据进行实时滚动订正,得到了很好的效果。得益于卫星遥感传输距离远、范围大、质量高等特点,目前的卫星反演地表温度最高空间分辨率已经达到 2 km,该技术能有效解决传统测温传感器和路侧红外测温设备监测范围小和布设成本高的问题。但是,路面的热辐射特性获取难度大、区域性很强,很大程度上影响了监测精度。同时,该技术手段需要使用路面历史温度数据进行修正,在应用于新建道路测温时,偏差较大。

(4) 光纤温度传感器

光纤传感器利用光波在光纤中传播时外界环境参量改变使光波的特征参量发生变化的特性监测温度^[30]。光纤传感器应用于道路监测时,最大的问题是传感器如何封装于路面结构中,因此国内外学者对其做了大量研究。文献[31]发现使用热膨胀系数大的封装材料处理裸光纤后可以提高其对环境温度的敏感性;文献[32]使用环氧树脂和聚四

氟乙烯作为封装材料,提出了 2 种封装结构;文献[33]提出了一种以细钢管作为封装容器、聚合物进行密封的结构,大大提高了传感器的温度敏感性。近年来,由于光纤传感器不仅应用于环境温度监测,也大量应用于应力、应变等结构参量的感知,如何制作集成多种功能的光纤传感器也愈来愈受重视。文献[34]开发了一种单光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器,能同时测量温度和轴向荷载,经过试验验证后,该传感器测量误差小,精度高、抗干扰能力强,但会损坏路面结构,且成本偏高,如何实现对路面整体温度场的监控和传感器与路面结构的兼容问题仍需研究。

对于传统电学式温度传感器,要想在道路全长范围内实现全方位温度监测,需布设大量传感器,这将大大提高公路建设和运营成本。此外,当前的传感器设计封装方面考虑不充分,对于埋在道路内部的温度传感器,施工过程会对其造成较大压力导致传感器存活率较低。另外,大部分温度传感器收集到的数据仍是一些原始数据,需要将感知到的路面温度数据进行处理和分析,实时性不能保证。

基于上述问题,对于车路协同下的温度感知技术,今后需要在如何实现道路温度大范围监测、优化传感器设计和封装、开发实时分析处理系统等方面进行优化。

2.1.3 路面气象状态及凝结物厚度感知

路面气象状态通常指路面干燥、潮湿、积水、冰冻、积雪等状态。当路面不处于干燥状态时,其摩擦系数会有不同程度下降,从而延长车辆的制动距离并增大曲线行驶时侧向滑移距离,对行车安全产生不利影响。此外,路面凝结物(水、冰、雪)厚度也是判别路面服务水平下降程度的重要指标。目前,对于路面气象状态和凝结物厚度感知的技术主要有 8 种。

(1) 光谱分析法

光谱类方法主要利用水和冰在红外光谱中的不同判断道路的气象状态,并通过红外吸收量值测量凝结物厚度。由于是非接触测量,该类方法应用较灵活。目前基于该方法的设备有 Luff 公司的 NIRS31-UMB、Vaisala 公司的 DSC111 等。瑞典中部大学的 Patrik Jonsson 科研小组对该种方法有很深入的研究,2012 年,他们在实验室环境中以卤素灯照射硅管和钢镓砷管作为光源,采集并聚类分析了 6 种状态路面的数据,结果表明,其对路面状态的识别度较好,但对积水和黑冰的区分度不好^[35]。为了适应现实环境中复杂光干扰的问题,该小组研究

人员改进了光源并且采用探测范围更广的红外摄像机,一定程度上提高了设备的抗干扰能力,但仍存在结冰与积水状态区分度低的问题^[36]。出于提高识别精度的目的,文献[37-38]将红外灰度摄像机采集的数据结合气象传感器数据进行修正,通过模型和算法的交叉验证,其识别准确度大大提高;2015年,文献[39]将多光谱图像采集设备应用于路面状态识别中,并结合光谱图像识别算法进行分析,获得了更高的准确性和实时性;2019年,文献[40]通过应用红外技术,设计了一种集成收发同体光电传感器,并成功开发了一种非接触式路面积水与结冰检测系统,该系统能够对路面的湿润程度进行定性评估,同时还可以准确地测量沥青路面上的积水深度和结冰厚度。然而,野外道路环境中光谱数据的分布与实验室环境下的差别较大,且检测设备的光学窗口易受污染,如何对干扰因素做出修正仍是待解决的问题。此外,光谱分析设备的价格昂贵,大范围推广难度较大。

(2) 光学偏振分析法

该方法利用入射光线经过冰与水分解的光的偏振态识别路面状态。因为光的偏振信息包含更多的特征数值,所以偏振分析能获得更多路面状态信息,且检测准确度更高。国外的相关研究较多,文献[41]用普通摄像头采集图像并进行了水平与垂直偏振强度分析,成功提取了路面积水、积雪的特征,识别正确率达到92.3%;文献[42]通过对比两幅同源但其中一幅不含偏振光的图像,结合粒度分析法基本实现了对积雪和结冰状态的识别;文献[43-45]开发了一种简化的基于红外偏振光的路面状态识别方法,并成功完成了低成本样机的测试。国内相关的研究起步较晚,文献[46]利用电控偏振采集数据,成功区分了道路的气象状态,但未能实现较强的识别功能;文献[47]开发了一种低成本的线偏振度路面状态成像识别方法,识别准确率高,但未在真实道路环境下进行测试。光学偏振分析和光谱分析类似,都基于不同介质的光学参数不同实现路面气象状态的识别,因此两种方法均存在设备昂贵、光学窗口易受污染等类似问题。

(3) 光学图像识别法

该方法利用高清摄像机采集道路的光学图像,并采用图像识别算法进行处理。近年来,随着算法的不断改进,该方法的识别准确度不断提高,并且该方法的硬件成本比较低,大范围推广难度不高。但是,因为识别准确度与光学图像质量关联性大,

该方法对光照、天气等不可控因素要求高,抗干扰能力和识别准确度与其他方法相比还有待提高。

(4) 微波反射分析法

利用微波反射原理实现凝结物厚度检测,是将微波信号发射到凝结物表面,其中的部分微波在凝结物与空气的分隔界面反射形成反射波^[48],使用检测芯片检测入射波以及反射波之间的幅值比和相位差。不同的凝结物厚度,具有不同的幅值比和相位差^[49]。最后利用检测出的幅值比和相位差推算凝结物厚度。

目前,基于该原理的测量设备有Lufft公司的IRS21等,测量精度可达0.01 mm,量程达到0~8 mm,但在测量不同范围凝结物厚度时精确度不同:0~1 mm凝结物厚度测量精度为0.1 mm;1~6 mm凝结物厚度测量精度为0.5 mm;凝结物厚度为6~8 mm时,测量值仅可作参考。虽已满足当前规范测量的性能要求,但这种测量精度的不稳定性导致其在应用中存在易误读的问题。文献[48]通过降低天线谐振频率、调整电路工作频率以及采用温度补偿等方法,成功提高了传感器的抗干扰能力。这些措施在一定程度上解决了传感器响应一致性的问题,特别是在批量生产过程中。但是,当路面冰层存在上表面不平整、明显分层并有大量气泡和大量裂缝等情况时,微波传感器在传播过程中会遇到折射和反射现象,这些因素导致冰厚测量存在较大的误差,并且其可靠性仍需进一步研究。文献[50]基于IRS21传感器对存在较大误差这一问题做了研究,发现精度变化是由检测芯片AD8302的测量误差导致的,在使用时应调整工作频率,使其处于芯片的低误差区;环境温度作用于电路系统,也是该问题出现的重要原因,通过加强电路抗干扰设计可以很大程度缓解电路系统的不稳定性,并提供一定的环境温度补偿。此外,由于受到温度、激励频率等因素的影响,微波传感器在测量回波幅值和相位时存在一定误差。

(5) 光纤传感分析

光纤传感分析是通过光纤传感器监测路面气象状态和凝结物厚度,传感器探测头端面被凝结物覆盖时,发射光纤发射的一些光线在光纤-凝结物层界面发生反射,而其余光线则进入凝结物层内部;在凝结物层内部,其中一些光线发生散射,另外一些光线在凝结物层-空气界面发生反射,最后一部分光线能够穿过界面,接收光纤探测到反射光和散射光,即可判断为路表处于凝结物覆盖的状态^[51]。根据探头检测到的反射光和散射光的能量

变化,通过观察光纤传感器线路电压的变化情况,判断路面凝结物的厚度。光纤传感器具有构造简单、高精度和便于操作等优点,此外,传感器前端的探头中缺少电气元件,具有较高的稳定性,不容易受到电磁干扰^[52]。但是,传感器需要嵌入路面结构中,这会破坏路面结构的完整性。

(6) 压电传感分析

压电传感分析的原理是基于不同材料对路面施加压力时产生不同的输出信号。压电平膜结冰传感器最具有代表性,主要是通过压电陶瓷的压电效应和逆压电效应实现信号的感知和传输,并结合物体的共振频率、质量和刚度之间的关系进行测量^[53]。压力传感器正反馈振荡电路如图4所示,图中, R_1 — R_4 为电阻, C_1 为电容, a 、 c 为接触点。

当表面结冰时,冰层将大大增加振动系统的刚度,刚度增大使得共振频率提高,因此,可以通过获取谐振频率信号实现冰厚的测量^[54]。压电传感器可以集成当下比较热门的压电自供电技术,实现传感器的自供电功能。但是,传感器的结构复杂,维修和更换难度较大,成本较高。

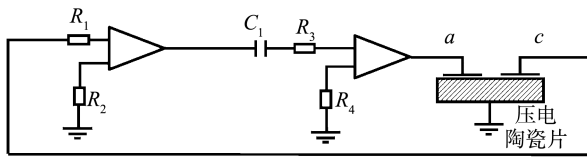


图4 压力传感器正反馈振荡电路

Fig.4 Oscillation circuit of pressure sensor using positive feedback amplifier

(7) 谐振特性分析

谐振特性测量方法是通过在被测谐振系统中施加驱动信号、改变驱动频率并记录响应信号的特性、激励驱动冰或水振动对谐振系统的特性参数进行测量的方法。当被测谐振系统受到外界驱动信号时,会发生共振现象,产生大幅度的响应信号。根据谐振系统的特性和驱动信号的变化情况,可以求解出谐振系统的共振频率、品质因数等参数。

此方法适合于测量黑冰,可以同时得到路面气象状态及凝结物厚度信息。文献[55]通过对一阶谐振频率的测量达到了较高的结冰、积水状态识别准确率,并且实现了极小凝结物厚度(4 mm)测量。但是,现场试验结果表明,该传感器监测范围有限^[56]。

(8) 电容式传感分析

电容式结冰传感器的原理是当路面气象状态

发生改变时,铺设的电容板之间电介质随之改变,从而引起电容变化,据此可判断路面是否被凝结物覆盖^[57-58]。文献[59]通过放置极板测量电容或是相邻极板间的电容差,再通过计算判断介质类型和不同介质的分界面,从而达到判断路面状态的目的,实现了较好的识别效果。但是,物体的介电常数会受到来自自身厚度、温湿度、盐度等因素的影响,多种因素共同作用,可能导致传感器数据可信度低、数据失真。文献[60-62]提出一种以多频电容信号作为复阻抗测量触发条件,以多种频率作为激励频率的低功耗传感器。

当前路面气象状态和凝结物厚度传感器主要分布在路侧和道路内部,安装在路侧的设备如光学相机不会对道路造成伤害,但其抗干扰能力弱;而安装在道路内部的设备如电容传感器,虽然检测能力强,但会影响路面结构强度。综合各自优势开发多传感器融合感知技术将是未来车路协同下的路面状态感知技术的主要发展方向。

2.2 路表功能状态感知

路表功能状态主要是对道路表面状况的实时感知和监测,对路表功能状态的准确感知有助于准确评估路面功能状态以供做出及时合理的养护决策,同时能够更加精准地进行道路维护和修复工作,提高道路的使用寿命。

2.2.1 路面病害感知

路面病害是指在道路表面出现的各种损坏、缺陷或异常情况,对交通安全、驾乘舒适性、噪音污染以及经济损失等方面都带来了不可忽视的影响。因此,及时发现、评估和修复路面病害,保持道路的良好状态十分重要。目前,系统的路面病害检测主要针对车辙和裂缝。

针对车辙的检测主要通过激光扫描路面、测量分析车辙的几何特征进而构建路面三维模型完成。文献[63]通过筛选三维图像中激光点的异常值,采用横截面深度数据和包络算法提取车辙的检测数据;文献[64]使用激光三角测量的路面车辙快速检测技术,有效、可靠地测量路面车辙,采用的车辙检测装置示意图如图5所示;文献[65]采用三维线扫描激光系统和惯性测量单元测量路面的横向位置以及车辙尺寸,采用的车辙尺寸和横向位置测量技术流程如图6所示。对于一般的裂缝检测,通过拍照和录像的方法采集路面病害数据,确定路面病害的类型及程度,之后使用先进的图像识别技术识别和解释路面的损伤状况,进而快速达到对路面损伤状况进行定量分析的目的。

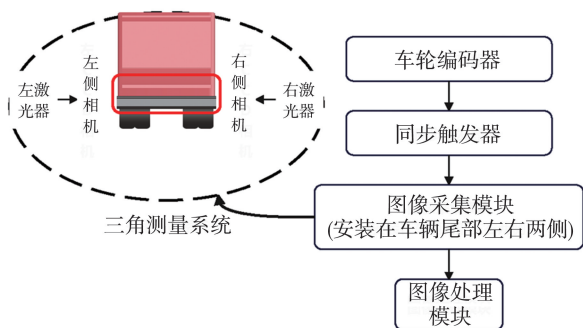


图5 车辙检测装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of rut detection device

当前无论是对车辙检测还是对路面裂缝检测,均不能直接输出路面病害的数据,而是需要结合如图像分析识别、路面三维模型构建等数据处理方法进行路面病害的判别,因此路面病害检测的精度和效率与数据处理方法有较大的相关性。因此,今后基于车路协同的路面病害检测技术可从优化数据处理算法、提高检测和数据处理的速度保证输出结果的实时性等方面进一步改进和提升。

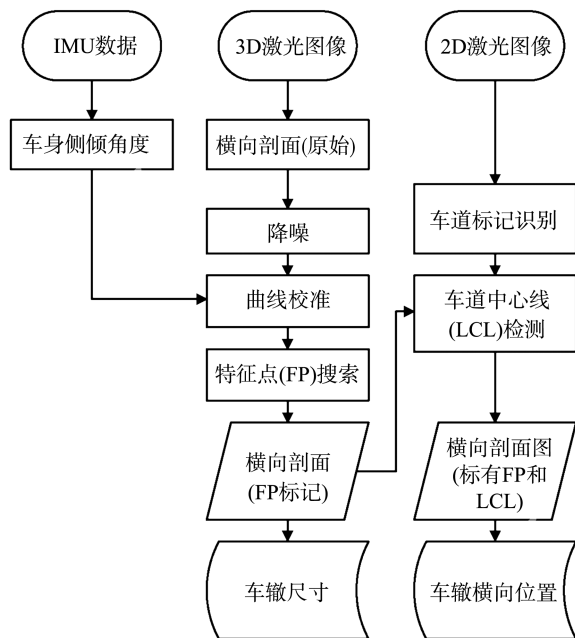


图6 车辙尺寸和横向位置测量技术流程图

Fig.6 Technical flowchart for measuring rut size and lateral position

2.2.2 路面抗滑性能感知

在当前自动驾驶背景下,路面抗滑性能是影响交通安全的因素之一,也是自动驾驶车辆控制算法的一个重要控制参数。目前,传统的检测路面抗滑性能的方法通常包括路表摩擦因数检测(直接法)以及路表纹理检测(间接法)两大类。基于摩擦因数的检测方法有横向力检测、纵向力检测、固定滑移率、可变滑移率等方法,基于路表

纹理的检测有铺砂法、排水法等。直接测量法检测抗滑性能结果较为准确,但其检测功能较为单一,检测成本较高,而表面纹理检测则克服了上述困难,有助于实现检测功能一体化,也将会更符合车路协同下的路面状态感知^[66]。文献[67]建立了基于防滑性能的3D纹理评估模型,根据骨料的类型和3D纹理,就可以直接评估路面的防滑性;文献[68]开发了一种3D激光扫描系统用于精确提取和评估平均纹理深度;文献[69]提出一种基于有效接触纹理区域的卷积神经网络模型,包含宏观和微观尺度的感知子模块,模型表现出更高的精度和性能,可用于抗滑性能分析的高效、非接触替代方法。

此外,建立基于车辆轮胎动力学的路面抗滑性能分析充分考虑了车辆与路面共同作用下的路面状态变化,有利于实现车路协同下路面状态感知,具有广阔的发展前景。文献[70]设计了一种基于车载摄像头的轮胎-道路峰值附着系数估计方法,该方法可以充分利用多源传感器信息,提高估计精度;文献[71]提出一种基于两轮车制动动力学模型的考虑前后载荷传递的道路摩擦系数估计新方法,该方法鲁棒性强、精度更高。

当前路面抗滑性能检测技术还主要是单一指标、单一功能,检测精度不高,对于今后基于车路协同的路面抗滑性能感知应从实现检测功能一体化,建立轮胎-道路联合仿真有限元模型^[72]等角度发展,以更好地服务未来智能基础设施。

2.2.3 路面平整度感知

路面平整度反映的是路面高程变化,其关系到行车的舒适性及安全性。传统的检测方法检测范围小、检测效率低、难以做到数据的实时分析和处理,不能达到车路协同下路面平整度检测的智能化和自动化要求。基于激光的断面检测法安装激光传感器、加速度仪等,以及数据采集、处理系统,是当前较为先进的路面平整度检测方法。文献[73]提出一种基于机载激光雷达的车辙和平整度检测方法,可以实现对路面高效率检测,为道路自动化检测提供了一种轻量化检测手段;文献[74]基于多个激光位移传感器、融合加速度计和姿态传感器,利用车载高速检测,设计了一种传感器融合路面断面数据采集方法,建立了相关数学模型,实现了自动采集。

此外,基于神经网络的路面平整度检测方法检测准确率高,检测速度快,表现出了较大潜力,其基本原理如图7所示。文献[75]提出了一种基于高

级递归神经网络的路面平整度估计框架,通过模拟测试评估分类,准确率均在 91.7% 以上;文献[76]提出一种基于轻量级残差卷积网络和时序加速的实时路面不平度识别方法,准确率高达 98.7%,显著提高了识别算法的准确率并减少了计算量,适用于路面不平度等级分类。

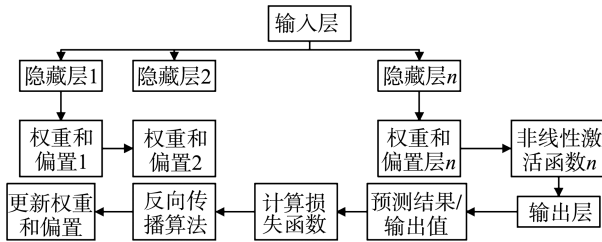


图7 神经网络基本原理图

Fig.7 Basic principal diagram of neural network

在当前大数据物联网时代,数据获取手段增多,数据获取难度减小,数据传输速率提高,基于神经网络的路面平整度检测方法应用前景广阔,但其存在神经网络算法本身的缺点,如数据需求量大、迁移学习的限制、对数据质量敏感等。因此,未来基于车路协同的路面平整度感知技术可在算法结构优化、多模态信息融合、结合物联网技术等方面提高感知效率和准确性。

2.3 路面结构状态感知

路面结构状态不同于路面交通环境状态和路表功能状态,其更加关注道路内部。当前普遍缺少对路面内部的力学状态感知,为此付出了相当大的代价,例如车辆在高速行驶时,道路突然出现塌陷导致车辆失控栽入坑洞,严重损害了人民的生命财产安全。通过检测路面内部力学响应或路基路面结构状态,包括力学响应和路基冻胀融沉变形等,便可避免路面突然塌陷等问题,同时对路面结构设计、突发性破坏预警和及时养护十分重要。

2.3.1 力学响应

路面结构力学响应参量包括应力应变、模量、位移、振动等,可以表征路面内部结构健康状况的变化,是结构状态监测的重要指标。最常见的方法是采用电阻式应变传感器(如电阻应变片、水平应变计等)进行测量,然后通过导体或者半导体器件输出电信号,再解调成力学响应信息。此类传感器的成本低,但是长期连续监测能力十分有限,一般多用于实验室环境下的力学响应测量。近年来,采用埋入式光纤传感器进行力学响应感知,得到了国内外多名学者的青睐,按照工作原理不同,可分为2种技术类型。

(1) 布拉格光栅准分布式光纤传感器

FBG 属于波长调制型测量敏感元件,其探测能力不受光源功率波动、光纤弯曲损耗、探测器老化等因素的影响,检测性能优异,适用于长期安全监测^[77]。采用复用技术在一条光纤上串联或安装多个 FBG 即可实现光纤光栅解调仪准分布式测量。具体方法为在光纤上以一定间隔安装多个 FBG,并将它们串联在一起,然后通过光纤光栅解调仪对每个 FBG 的反射信号进行测量和处理,从而得到光纤中不同位置的参数信息。

由于光纤光栅对外部参数具有很高的灵敏度、占地小等突出优点,广泛应用于工业和工程领域,是光纤智能结构的理想器件。文献[78]将光纤光栅传感器嵌入4种类型的沥青路面,建立路面结构的信息监测系统,研究了车速、轴载和温度对路面结构的受力响应的影响;文献[79]开展了基于光纤光栅的室内车辙试验,分析了光纤光栅应变响应与压实次数的关系,根据光纤光栅动态响应规律判断混合料的压实度。由于光纤光栅采用有线感知与传输方式,在布设装置时需要道路结构进行大面积开挖,且装置损坏后不易维修,导致在道路结构监测中的使用和维修成本增高^[80]。此外,光纤光栅监测范围较小,如何提高其复用性、集成多种感知功能、实现低成本大范围的监测尚待研究。

(2) 后向散射分布式光纤传感器

分布式光纤传感技术无盲区,突破了 FBG 解调复用传感单元数量限制和空间分辨率限制,因而称为分布式测量。光纤内部后向散射光信号的强度和频率与温度、应力等参量的变化有关,通过解析后向散射光信号,即可获得路面结构内部温度和应力的参量。常见的传感机理有3种,分别为基于瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射^[81]的传感机理。文献[82]简要分析了光纤传感器在交通基础设施结构健康监测中的初步应用和可行性研究;文献[83]使用基于瑞利散射的分布式光纤传感器,通过大量的应力-应变感知数据,将应变曲线形状的显著变化与裂纹的萌生和扩展联系在一起。相比于 FBG,分布式光纤传感器成本低、感知范围大,但测量精度受到元器件性能限制,并且信号比较微弱,传输和解调不便。

本节对2种技术路线进行了评价见表1。当然仅仅有光纤传感器是不够的,为了读取光纤传感器中的数据,需要使用光纤光栅解调仪进行光

谱信号测量和解调。光纤光栅解调仪可以实现对光纤传感器中不同位置的光谱信号的高精度测量和解析,从而得到相应的力学响应信息。在实际应用中,可以将光纤传感器和光纤光栅解调仪组合成一个完整的检测系统。该系统可以实时获取道路的力学响应情况,并进行数据分析和处理,从

而为道路的设计、施工和维护提供科学依据,检测步骤如图8所示。需要注意的是,在实际应用中,还需要考虑光纤传感器的精度、灵敏度、稳定性和可靠性等问题,以及光纤光栅解调仪的测量精度和解析能力等问题,需要进行一定的优化和校准。

表1 光纤力学响应传感器评价

Table 1 Comparative evaluation of optical-fiber based stress/strain sensors

类型	设备	优势	存在问题
基于布拉格光栅的准分布式光纤传感	布拉格光栅(FBG)	结构参量敏感度高、使用寿命长、体积小、可靠性高	成本过高、感知范围小
基于后向散射的分布式光纤传感	光导纤维	成本低、感知范围大	测量精度受器件性能和信号强度限制、信号解调和传输不便



图8 光纤传感器监测流程图

Fig.8 Flow chart of fiber optic sensor monitoring

当前光纤传感器应用在道路中监测力学响应状态时,需要埋入道路内部,将会产生应力集中、传感器存活率低、维修难度大等问题,今后采用光纤传感器检测时需要对其进行合理的防护设计,针对不同道路使用不同类型场景定制,做到因地制宜、布设数量合理、维修体系和方法优化,使其更好地为车路协同下的路面结构状态感知服务。

2.3.2 路基冻胀融沉变形感知

路基冻胀融沉变形是指在寒冷地区,由于土壤中的水分在冻结和融化过程中引起的体积变化,导致路基产生沉降和形变的现象,这是一种常见的工程地质问题,对公路、铁路等基础设施的稳定性和安全性造成一定的影响。路基冻胀融沉变形广泛出现在我国季节性冻土地区,导致道路整体承载能力下降,带来的道路病害难以养护和修复,严重影响行车安全。对于路基冻胀融沉变形进行实时监测具有重要意义,实时监测可以及时预警、预防以及评估分析问题,节约成本和资源,确保道路结构安全。目前,路基冻胀融沉变形感知技术主要有4种。

(1) 路基冻胀量分层观测

采用路基冻胀量分层观测的人工方法检测路

基冻胀,可用于判断水量控制是否合理、确定冻害发生位置等,在预防新建道路病害以及已建道路的冻害分析方面具有广泛应用。目前,常用的路基冻胀量分层观测方法包括单体冻胀尺法、叠合冻胀尺法、磁环法和冻胀计法^[84]。文献[84]采用传统的水准仪和位移计进行了冻胀融沉监测,总结出路基冻胀融沉变化规律;文献[85]采用路基冻胀量分层观测银西高铁甘宁段冻胀变形情况,并对观测数据进行了分析和研究。冻胀尺法和磁环法、冻胀计法具有不同的特点和使用情况,其中,冻胀尺法的钻孔会破坏路面结构,而磁环法精度较低,使用成本高,需要较大的工作量。无论哪种方法,其智能化程度及数据传输效率较低,难以适应车路协同下的路面状态感知。

(2) 电阻式变形传感

电阻式变形传感技术是一种较为常见的将所测物理量转为电信号的测量应变、位移的技术。文献[86]用包括电测位移传感器在内的自动化检测,采用自主设计的地面数据处理系统采集数据,掌握各时期冻胀量变化和冻胀速率变化,为后继冻胀处理提供依据。电阻式传感器的应用在很大程度上推动了路基冻胀监测技术发展,然而,土壤温湿度以及外部环境对结果影响较大,以及电阻式传感器经过长时间使用后会产生数据漂移现象,使得获取的数据与实际状态不符。

(3) 光纤变形传感

采用分布式光纤监测技术可以在多方位多视角获得路基冻胀融沉的具体变形情况,这将大大提高应用范围和准确率。其中FBG光纤光栅传感技术^[87]和分布式布里渊光纤传感技术^[88]最具有代表性。光纤传感器利用光纤作为介质,利用光信号进

行信息感知,具备光纤的特性和光学测量的特点。文献[84]将FBG光纤光栅传感技术和分布式布里渊光纤传感技术同时用于监测路基开裂和路基变形,并成功计算出各个测点的竖向变形;文献[89]系统介绍并使用FBG光纤光栅传感技术测量了路基不均匀沉降,对采集的数据进行了分析和处理,绘制出了路基的变形曲线。光纤传感器不受电磁影响,灵敏度高,适用于远距离监测。但光纤传感器检测的是应变和温度耦合的变化,因此在测量应变时,不得不进行温度补偿,使用难度加大。此外,光纤光栅只适用于测量静态或准静态物理量,在测量动态信号上稍显力不从心。

(4) 卫星遥感量测

遥感技术是指一种综合性技术系统,其可以与卫星联动,获取其数据,并能够利用遥感仪器对信息进行接收、处理和分析。遥感监测变形技术主要应用于具有大范围和大变形的领域,常见的遥感技术包括 SAR (synthetic aperture radar)、InSAR (interferometric synthetic aperture radar) 和 D-InSAR (differential interferometric synthetic aperture radar) 等^[90]。文献[91]采用集成扩展小基线子集方法 (extended small baseline subset method, ESMD) 和

短时间跨度(或短时间基线)干涉合成孔径雷达 (short temporal baseline, STL) 的永久散射体干涉合成孔径雷达 (permanent scatterer-InSAR, PS-InSAR) 和小基线子集干涉合成孔径雷达 (small baseline subset-InSAR, SBAS-InSAR) 技术,对北京大兴国际机场区域进行了长时间序列监测,获取了大兴机场主要交通线路沿线不同尺度的地表形变结果。卫星遥感量测技术监测范围广、测量难度小、成本较低,但其产生的噪点会造成信息损失和信息干扰;它还容易受到外界环境干扰,当有冰雪覆盖时会对结果产生影响。

上述4种路基冻胀融沉变形感知技术分析评价见表2。

基于车路协同的路基冻胀融沉变形实时监测是未来监测技术的一个重要发展方向,其未来发展方向主要包括精度和精细化、多元化监测,实时交互和反馈,以及自适应性和智能化等方面。未来理想的路基冻胀融沉变形监测将通过车辆传感器、道路内部及路侧设备共同实现实时监测,将车辆行驶过程中获取的数据与道路内部、路侧设备采集的数据进行整合和分析,实现对路基冻胀融沉变形的实时监测、及时处理和准确决策。

表2 路基冻胀融沉变形感知技术评价

Table 2 Evaluation of perception technology for roadbed frost heave and thaw settlement deformation

类型	检测设备	优势	存在问题
路基冻胀量分层观测	单体冻胀尺、叠合冻胀尺、磁环法和冻胀计法等	成本低、测量精度高	检测范围小、数据分析处理复杂
电阻式变形传感	电阻式位移传感器等	成本低、抗干扰能力强、测量精度高	检测范围小、容易出现数据漂移、耐久性差
光纤变形传感	FBG 光纤光栅传感和分布式布里渊光纤传感等	抗干扰能力强、检测范围广、灵敏度	损坏路面结构、成本高、需进行温度补偿、不能测量动态信号
卫星遥感量测	SAR、InSAR 和 D-InSAR 等	成本低、检测范围	易产生噪点、容易受到环境影响

2.4 小结

车路协同路面感知路面传感技术种类很多,但各自均还存在诸多问题。例如,红外光谱、偏振分析等非接触路侧传感技术,检测设备和原理通常比较复杂,维护成本较高,且受到环境因素(天气、光照等)干扰较大,检测精度和可靠性不高。光纤传感、电容传感等埋入式原位传感技术,虽然灵敏度高、抗环境干扰能力强、检测可靠性高,但是在布设时,会损害路面结构,结构兼容、耐长期荷载和长期监测能力不强。另一方面,不同指标参量对技术的

需求不同,导致感知路面对传感技术的整体技术需求十分复杂。例如,冰层覆盖着的黑冰路面非常常见,现有技术难以通过单个传感器同时实现状态精准识别和厚度测量。

因此,未来的研究除了继续解决应用难题,提高技术自身的水平之外,还应该着眼于研究多种传感器共同布设、融合的方法,实现感知功能一体化,以提高车路协同感知路面状态传感技术的整体性能。

而对于如何改善未来基于自动驾驶的车路协

同下路面状况感知技术,可从以下方面考虑。

(1)如何实现在自动驾驶车队形式作用下的路面状态感知。随着自动驾驶技术的兴起,自动驾驶下的以车队形式出现的车辆逐渐增多,目前仍然缺少用于成编车队(例如公交车队)的路表功能状态检测方法。该方法的提出将有利于维持路面功能状态,提高道路使用寿命。

(2)如何提高车辆探测路面状态的车道定位精度。通过车道精度(小于0.5 m的精度)定位精确的道路路面状况,将有助于实现车辆检测位置与传统的路面管理系统完美对接,从而实现后续养护的精准化和智能化。更精准的定位技术也有助于优化自动驾驶队列中的后续车辆的轨迹。

(3)如何充分发挥机器学习在路面状态感知技术中的作用。机器学习在路面状态识别方面有着非常强大的功能,今后还可进一步研究如何提高算法精度,突破其在车辆参数、算法适用性、速度限制等的局限性,开发效率更高、适用范围更广的路面状态感知综合算法。

3 车-路协同感知技术的数据处理方法研究

车路协同感知路面数据处理方法主要用于预测路面未来状态数据,要求数据处理方法有较高的预测准确度和计算效率,能在预测时间点到来之前完成数据输出,如图9所示。

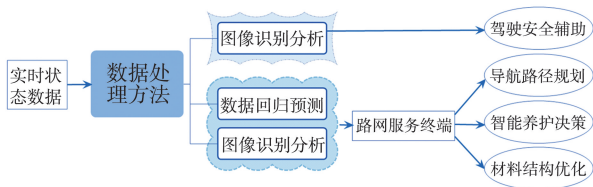


图9 车路协同感知路面数据分析方法

Fig.9 Vehicle-road collaborative perception pavement data analysis method

此外,根据前述内容,一些传感技术也需要使用图像识别分析将传感信号(光谱、光学图像等)转变为路面状态数据,这同样需要高准确度、高效率的数据处理方法。车路协同路面将会配备完善的感知网络采集大量的公路数据,而如何从不完整、有噪声、不确定的实际数据中,提取出潜在有用的信息,在此过程中找到路面信息数据之间可能存在的联系和规则,这些问题都需要更加先进的数据分析方法^[2]。近年来,大数据分析蓬勃发展,该方法能够高效率、高准确性地处理大量数据,为其在车路协同路面的应用中奠定了基础。

然而,感知网络所采集的各参量数据的表示形式不同并且数据来源于不同地理环境道路,使得数据的质量不能满足路网数据平台的数据分析要求。如何对不同结构、不同特征的数据进行清洗,并在此基础上融合其他道路相关数据(气象数据、交通流数据等)对路面状态进行高维分析预测,是目前大数据分析应用于感知路面系统的最大挑战。

3.1 数据预处理技术

由于受到环境、采集技术等因素制约,道路感知网络采集到的实际道路状况数据中会有很多不完整(缺少某些属性值)、含噪声(错误、偏离期望值的数据)、不一致(数据内涵出现矛盾)的低质量数据,而使用低质量数据是无法获得高质量处理结果的。因此,对采集的原始数据进行预处理,提高其数据质量是很有必要的。

目前的数据预处理方法已经比较成熟,对于低质量(不完整、含噪声、不一致)数据有很好的处理效果,并且大范围应用于各个领域。车路协同路面系统进行数据分析最常见的目标是通过进行回归预测分析和图像识别,实现路面状态预警预测和精准识别的功能。因此,本研究将重点总结几种在回归预测和图像识别中常用的预处理方法。

3.1.1 用于回归预测的数据预处理方法

(1)归一化

归一化处理是将一系列数据变化到某个固定的区间范围里。一般使用的方法是“最小-最大归一法”(min-max normalization),计算公式为:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

式中, x^* 是经过预处理后的数据, x 是预处理前的数据, x_{\min} 是该系列数据中的最小值, x_{\max} 是该系列数据中的最大值。

归一化能将数据进行非量化,消除不同量纲对回归预测的影响,同时避免数据量级差距过大,因为较大的变量会覆盖掉较小的变量的变化。

(2)标准化

标准化处理是把一系列数据成比例缩放,使该系列数据均值变换为0,标准差变换为1,计算公式为:

$$x^* = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (2)$$

式中, μ 是该系列数据中的初始均值, σ 是该系列数据中的初始标准差。

标准化不改变原始数据的分布情况,不会削弱

某些数据之间的相互关联程度,适用于实际嘈杂的大数据场景。

(3) 正则化

正则化是在回归预测分析中,解决过拟合问题(即模型对用来构建模型的数据预测准确度高、对同系列的其他数据预测准确率降低的问题)的方法。这种方法在数据量比较小的时候,非常有用,适用于数据采集积累量尚不足的新建道路。

3.1.2 用于视觉图像处理的预处理方法

通常,路面图像是由高清摄像机、红外光谱仪等设备在整个路网中进行采集。拍摄实际的路面图像,当遇到路面产生破损、路面具有不规则纹理、水的影响和路面阴影等问题时,导致图像中存在噪声。此外,外界环境的变化(太阳直射、夜晚、雨雪天等)会影响路面病害识别的效果。因此,在图像预处理阶段,为消除图像噪声需要采用图像滤波方法,并选择性保留目标区域的有用特征。

(1) 图像滤波

图像滤波法^[92-93]可以分为空间域滤波法以及频率域滤波法。空间域滤波法因为能批量处理图像,在图像分析数据量大的道路工程领域常常采用。常见的空间域滤波法通常包括均值滤波法^[94-95]、中值滤波法^[96],以及形态滤波法^[97]3种。

除了常用的3种滤波方法,国内外的学者也研究了其他图像滤波方法。为提高检测的准确性,文献[98]使用梯度倒数加权法消除噪声;文献[99]对OTSU法进行改进,提高了路面裂缝检测准确率;文献[100]采用Sobel算子对图像进行滤波;文献[101]使用改进的Sobel法进行图像滤波;文献[102-103]则使用以区域特征或匀光处理为主要手段的滤波方法。

(2) 图像增强

在空域滤波的准备阶段,原始图像转换为灰度图像^[104],经过滤波处理后,图像同时也会变得模糊。其中,图像中的灰度越接近背景灰度,图像的边缘就越容易变得模糊。此外,为了将边缘信息提取出来,需要使用灰度变换^[105]和直方图均衡化^[105-106]增强图像质量。

除了先前提及的方法,学者们还提出了另外的图像质量增强方法。文献[107]将灰度校正算法应用在了路面裂缝图像预处理中;文献[108]在细化图像目标方面使用了数学形态学方法,从而达到去除冗余信息,保存裂缝形态的目的。

3.2 状态预测方法

目前,在状态预测领域,最常用的方法是机器

学习。机器学习是一种采用先进算法与模型的系统,可以解决没有明确条件的各种问题^[109]。使用机器学习方法,可以帮助学者有效预测路面环境与结构状态的演变。

3.2.1 Logistic 回归

Logistic 回归满足S形分布特征,通过采集足够的样本数据,使用最小二乘法确定参数 a 和 b ,即可求解表达式,其表达式为:

$$P(Y=1|z) = \frac{e^{az+b}}{1+e^{az+b}}, \quad (3)$$

$$P(Y=0|z) = \frac{1}{1+e^{az+b}}, \quad (4)$$

式中: z 是输入变量; Y 是输出变量,为0或1; a 和 b 是参数。

Logistic 回归求解的是事件发生概率,因此一般用于按照危险事件发生概率划分路面未来一段时间的风险等级。文献[110-111]以Logistic 回归模型分析路面温度低于凝冰点的频率(结冰频率)与气温的关系,得出结冰频率迅速增加的临界气温,并分析了同一路段高速公路路桥的结冰气温差异。结果表明,该模型对于道路结冰的预测准确率超过80%。Logistic 回归结构简单,应用比较方便,并且效率很高,但是其准确度受到数据分布类型的干扰较大。

3.2.2 支持向量机

支持向量机的基本思想是针对训练样本,选取一个平面作为决策面,选取的结果就是要使正负样本之间的隔离边界最大。当从二维空间扩展到多维空间时,完全正确地划分两类变量的曲面成为超平面。高维数据通常将它们映射到更高维的空间以进行超平面划分。这种方法要求数据是线性可分离的。为了解决支持向量机在非线性可分离数据处理中的应用,采用了核机制。无论核函数是线性或者非线性,支持向量机都可以线性分离出空间中的数据,本质上可以认为对损失函数进行优化,求解损失函数的最小值^[112]的计算公式为:

$$\min J_p(\boldsymbol{\omega}, e_k) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega} + C \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2, \quad (5)$$

$$y_k(\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_k) + d) \geq 1 - e_k, \quad (6)$$

式中: J_p 为 $\boldsymbol{\omega}$ 和 e_k 的相关函数; y_k 为相关的数据标签, $y_k \in \{-1, 1\}$, $k=1, \dots, N$; C 代表损失函数的常数参量; $e_k \geq 0$ 代表松弛变量; $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_k)$ 代表映射函数。

采用支持向量机进行路面环境和结构状态预测具有广泛应用。文献[113]利用支持向量机模型对路面结构失效的概率进行了预测,文献[114]利

用支持向量机预测道路温度和结冰时间,文献[115]开发了一种基于最小二乘支持向量机的结冰预警模型。

3.2.3 人工神经网络

人工神经网络自主学习能力强,能够对数据进行有效地特征处理和预测。该网络的基本结构由输入层、隐藏层以及输出层组成。输出层和隐藏层之间的区别在于激活函数,常用的激活函数包括 sigmoid 函数、双曲正切函数(tanh)和线性整流(ReLU)函数^[116]。文献[117-118]将神经网络模型与经验回归模型结合,计算和模拟出了道路水膜厚度;文献[119]使用前馈神经网络建立了道路预防性养护模型;文献[120]结合神经网络和 Takagi-Sugeno 模糊模型,以水流和太阳辐射作为输入变量,预测了路面上水膜的厚度和发展情况。

除了上述方法,国内外研究人员还使用了许多其他的数据分析方法进行研究。文献[121]在对山西省全域的历史气象数据和路面状态进行多元回归分析后,得出了路面冰冻时间与降水量、平均气温和平均路面温度的相关系数;文献[114]提出使用贝叶斯模型计算路面出现低温的概率;文献[122]在 C4.5 决策树的基础上,使用数据挖掘方法建立了单站路面低温结冰的预报模型;文献[123]基于地理信息系统获取路面冰冻灾害的风险因子和权重,进而划分道路结冰风险等级;文献[124]基于四分位动态差分法和线性回归法提出了路面摩擦因数与冬季路面状态的关系模型。

3.3 图像识别方法

通过图像预处理和图像增强技术,得到的路面图像的噪声低、对比度高。图像分割法可以对病害的边缘信息进行提取,提高病害信息识别成功率。机器学习方法既可用于识别路面病害,也能对光谱等环境状态传感技术输出的图像进行分析。

3.3.1 图像分割法

常用的图像分割方法通常包括边缘检测法、形态学检测法、阈值分割法 3 种。

(1) 边缘检测法

为了更好地探究病害的边缘信息,可以使用边缘检测法。其主要是采用微分函数对病害边缘的灰度情况进行处理,从而识别出边缘信息,在边缘搜索和边缘检测中,可采用不同的边缘算子^[98,125-126]。其中, Prewitt 算子和 Laplace 算子等是较为常见的边缘算子, Laplace 算子是二阶偏导数算子,可以同时检测水平和垂直方向的裂缝。

(2) 形态学方法

膨胀、腐蚀、开运算和闭运算等变换广泛应用在图像处理的数学形态学方法中。文献[108]分析得出可以采用各种形态变换获得裂纹的特征;文献[127]采用数学形态学方法提取裂纹边缘信息;文献[128]通过形态学操作降低噪声,从而能更清晰地识别裂纹;文献[96]采用对裂纹边缘负面影响较小的闭合操作处理图像,获得了较为清晰的裂纹特征;文献[129]认为形态学方法容易丢失裂纹边缘信息;文献[130]采用膨胀和腐蚀操作获得了较为清晰的边缘裂纹图像。

(3) 阈值分割法

阈值分割法可以根据阈值将图像分为两部分,阈值以下的部分就是需要主要关注的路面病害发生的区域,通常采用局部阈值分割方法、全局阈值分割方法 2 种方法进行阈值分割。文献[96,100]采用灰度拉伸对图像进行预处理,在降低图像噪声方面取得了较好的结果。在大津法阈值(Otsu's thresholding, OTSU)分割后,文献[96]还采用了交叉结构元件进行闭合操作,以组装裂纹;文献[94]改进了基于图像变换的水泥路面裂缝检测算法;文献[131]对着色路面裂缝图像采用局部阈值分割方法,处理效果较好;文献[132]还提出基于 OTSU 算法和自适应形态滤波方法的算法,检测效果更好。

(4) 图像后处理

在经过上述步骤处理图像后,如果提取到边缘信息仍有困难,则需要进行图像后处理,如形态学图像处理^[96,128,130]、最大连通域降噪^[96,131]或边缘连接^[133]等。

3.3.2 机器学习方法

机器学习算法用于图像识别,主要是通过已有的路面照片训练模型,使其能高效准确地对海量未识别的照片进行识别分类,一般不需要对图像进行分割和后处理,也能有比较好的识别效果。文献[134]对多级支持向量机学习模型的参数采用人工蜂群算法优化,从而实现对路面病害的准确分类。为提高预测准确率,还可以使用微分滤波的方法分析病害特征。文献[135]采用不同的函数对路面病害进行分类和预测,大大提高了识别裂缝和坑洞的准确率和速度;文献[136]使用机器学习算法对沥青路面图像进行裂缝检测;文献[137]对人工神经网络进行人工蜂群算法优化,对具体的路面病害类型进行分类,效果突出;文献[138]为了更好地协助路面管理系统决策,引入了神经网络模式识别模型。

此外,卷积神经网络应用越来越广泛,其采用

卷积运算进行计算,属于深度神经网络,和只能使用全连接层的普通的人工神经网络相比,其计算效率更高,卷积神经网络能够以更低的代价完成复杂的特征学习任务,计算成本更低^[139]。但因为构建其所需的规范数据集难度较大,目前在路面状态预测分析的领域应用尚浅。

3.4 多模态数据融合

随着 5G 技术的发展,通信基础设施可实现多种通信模式,包括车辆到车辆、车辆到基础设施、基础设施到车辆、车辆到道路、车辆到个人和车辆到传感器^[140],充分利用上述通信模式,将每个传感器收集的数据在感知块中进行处理,即可将收集的原始数据转换为可理解的信息。尽管单一感知技术已经较为成熟,但是关于如何实现多模态数据融合研究仍较少。多模态传感器融合是指将多个不同类型的传感器采集的数据进行有机整合,以提高检测系统的精度、鲁棒性和可靠性。多模态传感器融合可发挥雷达、摄像头等不同传感器优势,更好地实现路面状态感知。当前多模态传感器数据融合有多种不同的框架,各有其特点、能力和局限性。

3.4.1 概率框架

通过经验获取的数据可采用基于概率框架的机器学习处理和分析^[141]。通过将概率密度函数^[142]应用到概率融合方法中表征传感器数据的不准确性。在处理决策或估计问题时,可以通过结合先验数据和观测数据得出后验概率。其中,贝叶斯方法广泛应用在概率框架中。在机器学习中,朴素贝叶斯模型假设目标样本的特征属性之间相互独立,学习输入与输出之间的联合概率分布,基于贝叶斯公式求解,贝叶斯基本公式为:

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)} = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}, \quad (7)$$

式中: $P(A)$ 和 $P(B)$ 是先验概率(可通过计算求得); $P(A|B)$ 是条件概率(通过对样本的训练求得); $P(B|A)$ 为后验概率,是朴素贝叶斯模型求解的目标。

通过贝叶斯统计理论对各个传感器采集的数据进行融合,从而得到最终的融合结果。这种方法适用于各个传感器采集的数据之间存在先验知识和概率分布的情况。贝叶斯理论在机器学习领域具有广泛应用,最常用的贝叶斯机器学习模型包括朴素贝叶斯模型和贝叶斯网络模型。文献^[143]开发了一种基于选择性加权贝叶斯模型的卡车跟踪算法;文献^[144]基于多变量提出了一种高速公路交通事故风险预测的动态贝叶斯网络模

型,整体模型预测准确率高达 84.9%;文献^[145]建立了多要素贝叶斯网络模型,计算出了各变量对安全的贡献值;文献^[146]建立了贝叶斯网络模型分析高速公路改造区交通冲突中各种影响因素之间的不确定交互作用,采用的贝叶斯网络计算模型如图 10 所示。

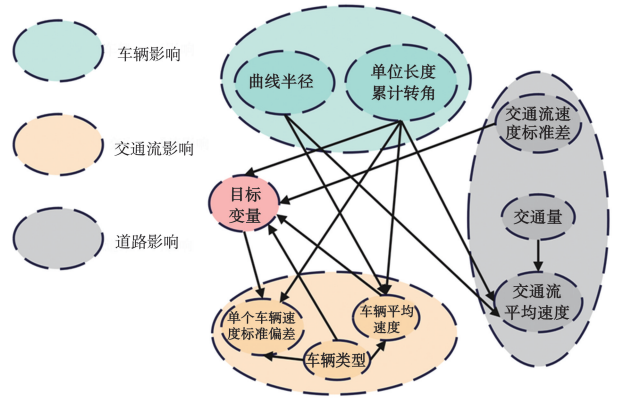


图 10 贝叶斯网络模型

Fig.10 Bayesian network model

贝叶斯模型虽然理论上可行,但计算上面临很大挑战,因此,不得不采用一些近似的方法,如变分法,即便如此也无法保证结果的精确性,并且无法解决数据缺陷问题。

3.4.2 证据理论框架

多模态传感器融合证据理论框架是一种对多个传感器(例如视觉、听觉、触觉等)的信息进行融合的方法。该框架基于证据理论,旨在有效地组合和推理来自不同传感器的证据,以得出更准确和可靠的结论。在证据框架中,使用概率质量函数进一步使用置信度和可信度表征数据,并使用 Dempsters 组合规则融合数据。Dempster-Shafer 证据理论作为贝叶斯理论的扩展,用于处理条件较弱的不确定信息,并将多条证据进行联合组合,使结果更有说服力^[147]。令 A 为辨别框架 Ω 的任意子集,其对应于一个数 $M \in [0, 1]$,并且满足

$$M(\phi) = 0, \quad \sum_{A \subseteq \Omega} M(A) = 1,$$

式中, M 为 2^Ω 上的基本概率分配函数, $M(A)$ 为 A 的基本概率数。

根据基本概率分配函数,可定义命题的信任函数 $P_{Bel(A)}$ 和似然函数 $P_{Pl(A)}$,公式为:

$$P_{Bel(A)} = \sum_{B \subseteq A} M(B),$$

$$P_{Pl(A)} = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \cap A \neq \phi} M(B),$$

式中, $P_{Bel(A)}$ 表示对 A 的总体信任, $P_{Pl(A)}$ 表示不否定 A 的信任程度。

根据似然函数计算每个证据对各个假设的支

持度,根据证据的支持度函数和证据的组合规则,计算证据的组合支持度函数,基于组合支持度函数,计算每个假设的置信度。通常情况下,可以从合成支持度函数中找到具有最大置信度的假设,最后即可根据待解决问题的具体要求进行推理和决策。文献[148]提出了一种包括 Dempster-Shafer (D-S)证据理论信息融合技术在内的损伤识别方法,形成了一种加权和选择性的信息融合技术,以减少不确定性对损伤识别的影响。虽然证据框架允许模糊和不确定数据的融合,但它不能解决数据不精确等问题,因此在组合明显矛盾的数据时无效。

3.4.3 模糊集理论框架

模糊集理论是一种处理含有缺失数据的理论预测方法,它引入了一个新的概念——隶属度^[149]。隶属度函数是模糊集理论中的一个关键概念,用于描述元素与模糊集之间的隶属关系。在模糊集理论中,常用的隶属度函数有多种类型,其中最常见的高斯隶属度函数、三角隶属度函数以及梯形隶属度函数3种。隶属度函数在模糊集理论中具有重要作用。通过选择合适的隶属度函数和调整函数的参数,可以准确地描述元素与模糊集之间的隶属度关系。由此将模糊概念转化为数学模型,并进行相应的计算和推理,从而实现对不确定性和模糊性信息的处理和分析。采用模糊集理论框架实现多源数据融合流程图如图11所示。

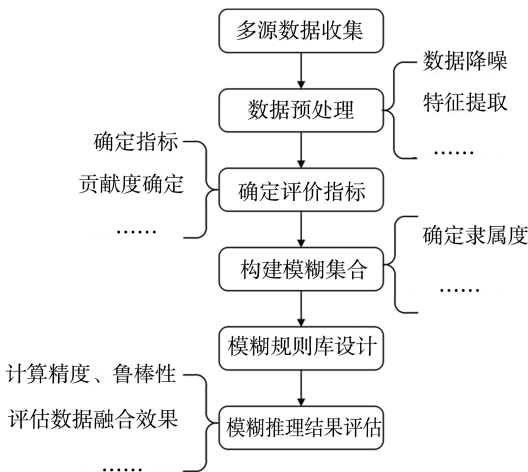


图11 基于模糊集理论框架的多源数据融合流程图
Fig.11 Flow chart of multi-source data fusion based on fuzzy set theory framework

文献[150]引入模糊集理论中的隶属函数作为支持函数,提出一种改进的证据论多传感器数据融合方法;文献[151]将车载诊断中的车辆数据与路边单元中的静态道路数据融合在一起,使用可变隶属度模型计算实时交通评估得分。模糊框架允许处理部分数据,适用于信息不足的环境,

但主观性较强,在数据噪声较大、模糊集之间存在交叉或重叠等复杂情况下,模糊集理论的效果较差。

3.4.4 基于粗糙集理论框架

在基于粗糙集理论的方法中,使用精确近似和经典集合论算子调整边界处理模糊数据^[152]。粗糙集理论的核心概念是粗糙集,它由等价关系和不确定性区域组成。等价关系定义了样本数据中的相似性或等价性,而不确定性区域则表示数据的不确定性或不完全性。粗糙集理论的主要步骤包括:(1)数据表达,将原始数据转换为一个信息系统。(2)等价类构建,根据属性之间的相似性或等价关系,将样本划分为不同的等价类。(3)下近似集和上近似集,根据等价类和属性之间的关系,定义下近似集和上近似集。(4)知识提取,通过分析下近似集和上近似集之间的关系,提取出数据中的模式、规律和知识。采用粗糙集理论框架实现多源数据融合流程图如图12所示。

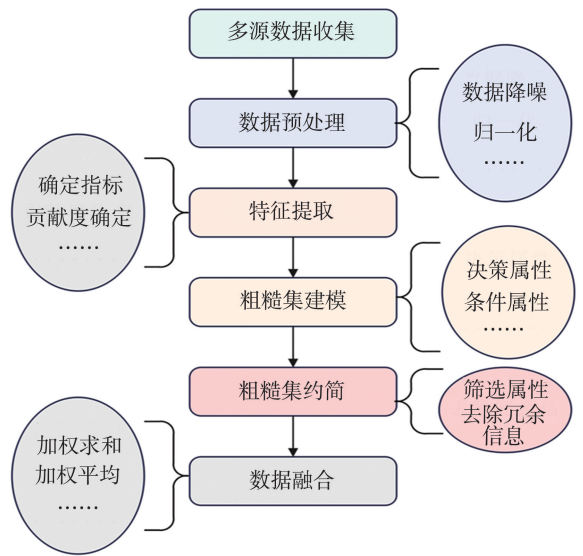


图12 基于粗糙集理论框架的多源数据融合流程图
Fig.12 Flow chart of multi-source data fusion based on rough set theory framework

文献[153]将粗糙集理论和神经网络理论相结合,借鉴已有的桥梁影响因素理论成果,采用数值模拟与数据融合的方法,将多因素数据融合应用于斜拉桥安全评价;文献[154]提出一种基于模糊粗糙集特征选择和堆叠集成的混合多传感器融合技术的系统预测性维护框架,用于对具有不确定性特征的故障条件进行有效分类。模糊集理论虽然不需要任何初步或补充信息,但需要足够的粒度^[155],容易受到噪声、异常值以及冗余信息的影响。

3.4.5 混合融合框架

混合融合算法背后的主要原则是不同的融合

方法(如概率框架、模糊理论框架、证据框架等)不应是竞争关系而应该是互补。基于混合的框架将以更完整的错误数据处理为目的,并以互补的方式部署^[156]。文献[157]提出了一种异构图像间多特征融合的混合融合算法;文献[158]提出混合密集传感器网络技术,将传感器数据融合到单个损坏检测特征中,提供了一种简单而稳定的检测大量传感器的方法。混合融合算法可以通过整合不同算法或模型的特点和优势,提升系统的整体性能和效果,是今后多源数据融合的有效手段。

3.5 小结

基于机器学习的大数据分析方法已经在车路协同路面领域有了较多应用。其中,常用的预测算法如 Logistic 回归、支持向量机、人工神经网络等的数学原理已经比较完善和清晰,计算分析的准确性在特定人工特征设计下可达到很高水平,并且对于样本数目不足、数据集规范程度不高的复杂道路也能有较好的预测结果,但在面对海量数据时,计算效率仍无法达到大幅领先预测时间点的需求。近年来兴起的具有通用、全自动、高效率特点的深度学习方法,目前只在图像识别方面有较好的应用,因为其模型训练方式原理不明确,对于训练数据集的规模和质量有很高要求,因此对于目前尚未形成规范完整的路面状态数据集的感知路面适配性不足。在多源数据融合方面,单一数据分析处理技术已经较为完善,但多源数据融合感知在数据缺陷问题解决、冗余信息分析、数据噪声处理等方面均存在一定的缺陷。

未来对于数据分析方法,要研究构建规范完整的路面状态数据集的方法,减少人工干预;还要全力突破深度学习等高效通用算法的应用瓶颈,整体提升数据分析方法的效率,提高状态预测的时间分辨率;更要注重多种数据融合处理,充分利用多源数据信息,提高数据处理效率和精确度。针对道路不同使用场景,定制不同类型,优化维修体系和方法,使其更好地为车路协同下的路面结构状态感知服务。

4 车路协同感知路面技术未来发展方向与趋势

目前,车路协同感知路面发展已经初具雏形。未来随着技术性能的提升,其使用效能将会进一步提升。在此基础上,车路协同路面将会实现与其他

智能路面技术的有机融合,形成功能完备的智慧道路基础设施体系。

4.1 车路协同感知路面未来发展方向

已知的车路协同感知路面技术还存在传感元器件耐长期荷载能力差、与路面结构兼容性不好、数据处理方法准确率和计算效率低、无法充分融合多模态传感数据等诸多与功能架构相悖问题。此外,现有的车路协同感知路面功能虽然已经能够满足智慧基础设施的基本要求,但智能化水平不高、依赖人工干预等问题依然存在,阻碍了车路协同路面发挥其最大的工作效率和利用率,因此技术性能提升是车路协同感知路面发展的必由之路。

4.1.1 现有技术融合升级

对目前常用的技术手段进行升级和多技术手段融合是技术性能提升的主要途径之一。未来,综合光纤光栅、压电等先进传感技术,研发具有自计算、自诊断、信息存储与传输、数字输出等功能和耐路面长期荷载能力的微型传感元器件,并在路面结构中阵列化布置,形成能实时动态识别与评估路面温湿度、气象状态、凝结物厚度等环境状态的先进感知网络。

同时,综合 5G 通讯技术和路侧小型数据集成单元,采用点云全景重构技术,实现雨、雪、冰等实时变化条件下的路面摩擦系数的精准评估,并综合 Carsim 与 MATLAB/Simulink 动力学联合仿真平台,实现对路面抗滑功能状态预测。根据分析结果,一方面可以向当前路段的无人驾驶车辆播报实时制动能力和舒适性情况,实现无人驾驶全天候安全辅助功能;另一方面,路侧数据集成单元会收集并存储路面感知网络采集的感知数据,然后上载至路网数据平台。经过大数据超精准预测技术分析后,数据平台会构建高时空密度的路网未来服役状态数据图,并实时传输至路网服务平台。服务平台会通过路径优化模型并结合路网交通流数据,将其转化为各路段不同时间段的通行时间成本和驾驶行为模式(行驶速度等)。当无人驾驶车辆联通路网服务平台,就能接收到出发地和目的地之间路段信息,选择合适的路径,实现最小行驶时间成本的导航路径规划。

4.1.2 新技术方向

除了现有技术的融合升级,开辟新的技术方向,是提升技术性能、最大化使用效能的另一种重要途经。目前,得益于材料、机电、计算机等基础技术的进步,出现了很多新的技术方向,包括智能颗

粒技术、数字孪生技术等。

(1) 智能颗粒传感技术

近些年来,由于微电子技术与机械工程技术的

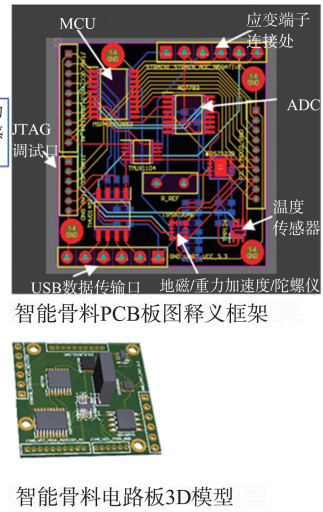
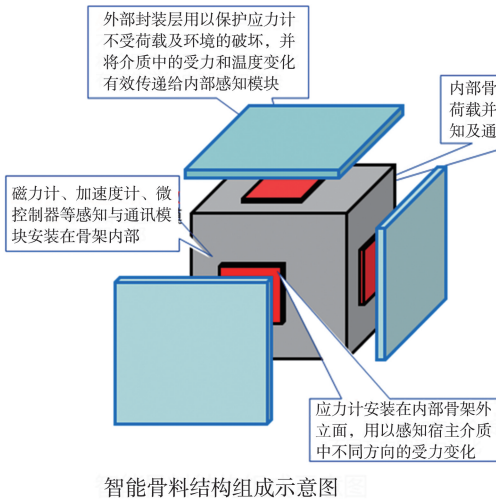


图13 集成化智能传感装置

Fig.13 Integrated intelligent sensing device

文献[159]采用智能骨料传感器开展沥青混合料现场压实试验,研究不同压实模式下沥青混合料的运动与受力特点;文献[160]使用 Smart Rock 和加速度传感器对振动压实过程中沥青路面的动力响应进行了测量,该装置可集成湿度、应力、应变等多种类传感器,具有体积小、精度高、监测数据类型丰富等多个优势。然而,限制此类传感器大规模工程应用的重要原因是电源问题^[161],基于压电技术的传感器供能技术的发展将不断解决这一问题。文献[162]设计了一种自供电无线传感器,能够实现长期检测、存储和传输历史应变;文献[163]使用压电传感器检测交通荷载信号,其增加了自供电传感器的功能,也可适用于损坏诊断;文献[164]使用双晶片悬臂梁式压电装置收集道路中的机械能,为加速度传感器和射频通信提供能量,收集到的能量可以满足加速度传感器数据收集和传输;文献[165]对热电发电的概念框架进行了研究,并对能量收集概念在道路基础设施车路协同和监测过程中的应用进行了详细讨论,其认为热电技术为道路车路协同传感器电源供电,这一技术将会解决一般传感器长期工作的供电问题。

因此,将智能颗粒感知元件融入路面的信息感知是具有很大发展潜力的技术之一,但尚处于初步试验阶段。智能颗粒在未来将会突破小体积集成技术困难的瓶颈,并通过揭示测量误差传递机制,开发误差削弱技术,达到体积小、集成度高、误差传播控制能力强、数据收集质量高的技术水平,解决

高速发展,基于机电系统技术的集成化智能传感装置在道路结构性能监测中得到较多的应用研究,集成化智能传感装置如图13所示。

现有路面埋入式结构状态监测传感器功能单一、多传感器数据融合困难的痼疾,实现具有自适应、自动化、自供能、能容纳新技术以及适应气候变化的路面结构状态长期动态感知功能。

此外,通过智能颗粒感知与加速加载模拟试验得出的轴载和环境温湿循环等耦合作用下的路面结构内部裂纹拓展、骨料重排等微结构参数,建立与路面结构宏观性能指标参数变化的关联模型和结构状态多参数量化描述模型,建立时空维度路面结构状态演化机制。同时结合考虑时变效应的路面结构(宏观)与材料(微观)力学响应的跨尺度仿真分析方法,精准预测重复荷载作用下路面结构性能演变规律,实现路面结构性能的高精度评估预测。

(2) 数字孪生技术

数字孪生是物理世界中物体模型在数字世界中数字化镜像的形成过程和方法。通过传感器和促动器,感知物体在物理世界的全要素数据,传输至数字世界,通过聚合、分析建立数字化镜像模型,在数字世界中预见其发展的全过程,以指导物理世界的物体行为。自2017年以来,数字孪生的相关研究呈现爆炸式增长。随着研究热点的提高,这一概念的外延和内涵不断扩大,从最初的工业生产过程管理新范式到智慧城市的关键技术,这一概念已经显示出巨大的研究价值和社会价值^[166]。目前针对数字孪生技术的研究大都集中在模型构建方面,其中,文献[167]首次提出一种关于数字孪生的有限元模型用于裂缝发展分析;文献[168]提出了道路

基础设施数字化的新概念,通过 360°全景摄像机、GPS 设备和其他物联网设备组成的数字孪生箱,实时感知周围环境数据,并在云端构建出现实道路环境的虚拟映射。

在道路基础设施工程领域,数字孪生的应用尚处于起步阶段,其道路模型的构建和映射方法仍需要研究,其强大的预测和推演能力,对基于路面长期演变模型的全生命周期管理的意义重大。基于数字孪生技术,充分利用路面分析模型、传感器采集更新、历史路面状态等数据,集成多物理量、多尺度的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,反映整个路网所有路段路面的全寿命过程。在虚拟空间中,通过推演合理性和适用性,可以实现路面全寿命的一体化管理。在设计施工阶段优化路面的材料结构设计,从根本上最大程度延长路面使用寿命;在管理养护阶段,选择最佳的养护时机,以最小的成本维持路面的高服务水平。

4.2 车路协同感知路面发展趋势展望

车路协同感知路面作为智慧道路基础设施的重要组成部分,其最大使用效能的发挥,很大程度上依赖于智慧基础设施各部分之间的协同配合。因此,车路协同感知路面终极目标是和其他智能路

面技术融合,构建集成感知、自诊断、自愈合、自俘能等全自动化功能的全方位、高智慧水平的智慧道路基础设施,形成一体化的智慧道路体系,车路协同路面智慧感知系统如图 14 所示。一方面,车路感知路面可以作为自愈合路面技术、主动融冰雪技术等多功能路面技术的信息来源,实现最佳时机决策和技术实施监控的功能。以自愈合路面技术为例,未来的车路协同感知路面已经实现对于路面温度的全方位监控,同时也构建了路面结构的长期衰变性能机制。因此,可以基于车路协同感知路面提供的衰变机制决定自愈合感应加热的最佳时机,同时监控感应加热的路面温度情况,使得路面自愈能力达到最高水平。此外,微胶囊自愈合技术可以与智能颗粒技术联合,当路面结构出现老化时,智能颗粒可以监测老化的发展趋势,并决定何时释放胶囊内再生剂,最大程度提高微胶囊的利用率。另一方面,车路协同感知路面未来的感知元器件大都使用无线传输方式,其能量不能再通过电缆由道路电网供给。因此,能实现自给自足的自俘能路面技术和道路电网支持的无线充电路面技术,两者彼此配合,共同构建稳定高效的能源供给,将会更适配未来的车路协同路面。

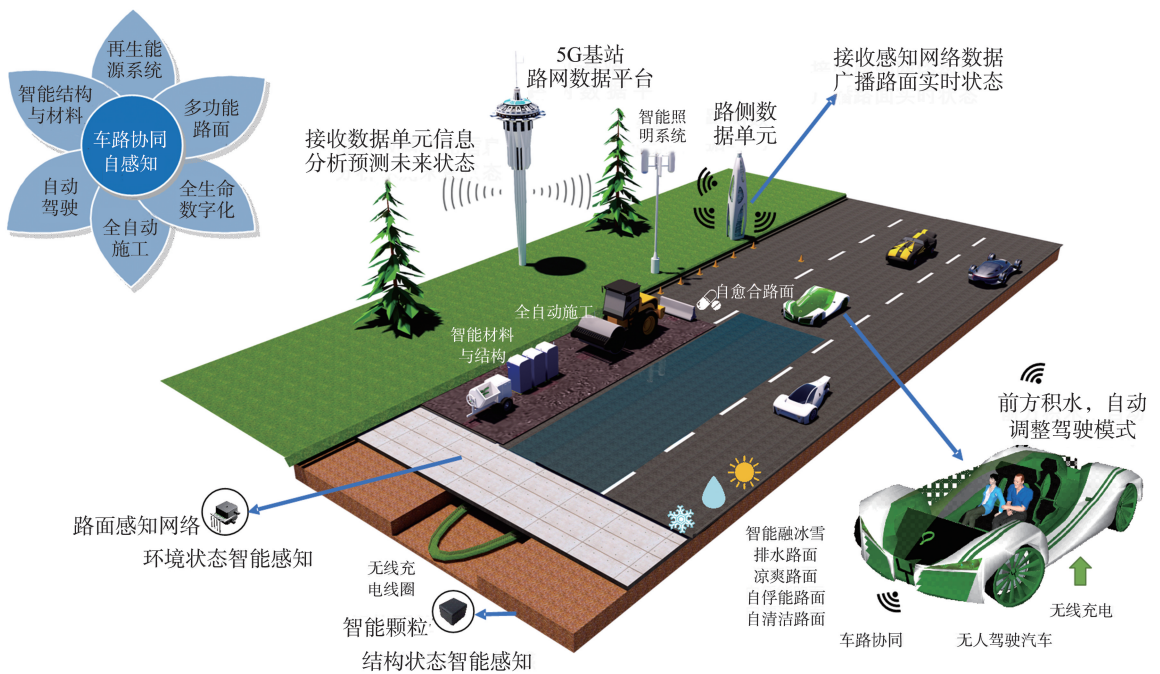


图 14 基于车路协同的智能感知路面基础设施展望

Fig.14 Outlook on intelligent perception road infrastructure based on vehicle road collaboration

5 结束语

基于车路协同的路面感知技术是支撑智慧道

路基础设施的关键,其发展与应用水平直接决定该领域的未来走向。目前,相关感知功能和技术种类繁多,但缺乏系统性研究,不利于感知路面技术领域的整体发展。围绕该问题,本研究进行了深入的

综述性研究。本研究对车路协同感知路面的功能框架和物理框架进行了分析,同时梳理总结了车路协同的路面状态传感技术和数据分析方法。同时,在以智能为重要特征的新型道路基础设施建设需求不断增长的大背景下,本研究绘制了以车路协同路面为主体的未来高智慧道路基础设施体系发展蓝图,进而为智慧交通宏伟愿景贡献智慧。此外,研究给出了今后车路协同下的路面状态感知技术发展方向,强调了以增强系统智能化及自动化水平为基本思路,以增强车路协同感知路面状态传感技术的整体性能以及系统稳定性、降低施工和使用成本、提高测量精度为主要目标方向,通过多种传感器协同布设、现有技术升级、多模态数据融合、突破现有通用算法应用瓶颈等研究手段,全方位多角度提升车路协同路面状态感知技术水平,努力充当未来智慧基础设施构建的先锋力量。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部印发《指导意见》推动交通运输领域新型基础设施建设[J]. 中国交通信息化, 2020(9): 92.
The Ministry of Transport issued the "Guiding Opinions" to promote the construction of new infrastructure in the field of transportation[J]. China Transportation Informatization, 2020(9): 92.
- [2] LINBING W, 王含笑, 赵千, 等. 智能路面发展与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 50-72.
LINBING W, WANG Hanxiao, ZHAO Qian, et al. Development and prospects of intelligent pavement[J]. Journal of Chinese Highways, 2019, 32(4): 50-72.
- [3] 宋小金, 樊亮. 基于FWD的沥青路面动态弯沉温度修正系数[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 123-128.
SONG Xiaojin, FAN Liang. Dynamic deflection temperature correction coefficient of asphalt pavement based on FWD[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2018, 51(3): 123-128.
- [4] 于华洋, 马涛, 王大为, 等. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
YU Huayang, MA Tao, WANG Dawei, et al. Review of academic research on pavement engineering in China · 2020[J]. Journal of Chinese Highways, 2020, 33(10): 1-66.
- [5] 邓小伟. 浅谈弯板式动态称重系统[J]. 衡器, 2013, 42(9): 43-59.
DENG Xiaowei. A brief discussion on the bent plate dynamic weighing system[J]. Weighing Instruments, 2013, 42(9): 43-59.
- [6] 马晓辉. 基于光纤光栅高速公路动态称重系统研究[J]. 技术与市场, 2017, 24(11): 148.
MA Xiaohui. Research on dynamic weighing system for highways based on fiber Bragg grating[J]. Technology and Market, 2017, 24(11): 148.
- [7] 罗晓光. 光纤光栅高速称重系统的研发[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LUO Xiaoguang. Research and development of fiber Bragg grating high-speed weighing system[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [8] 王强, 刘仰韶, 张文忠, 等. 光纤高速汽车动态称重系统[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 145-150.
WANG Qiang, LIU Yangshao, ZHANG Wenzhong, et al. Optical fiber high-speed vehicle dynamic weighing system[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(3): 145-150.
- [9] 徐树山. 电容式车辆称重装置动态性能测试与分析[J]. 公路交通科技, 2008(9): 121-125.
XU Shushan. Dynamic performance testing and analysis of capacitive vehicle weighing device[J]. Highway Transportation Technology, 2008(9): 121-125.
- [10] 程路, 李青, 张宏建. 软质电容式车辆动态称重系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(8): 149-153.
CHENG Lu, LI Qing, ZHANG Hongjian. Soft capacitive vehicle dynamic weighing system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(8): 149-153.
- [11] 程路, 李青, 张宏建. 基于软质电容式称重传感器的车辆动态称重系统[J]. 计量学报, 2008(4): 334-338.
CHENG Lu, LI Qing, ZHANG Hongjian. Vehicle dynamic weighing system based on soft capacitive weighing sensor[J]. Chinese Journal of Metrology, 2008(4): 334-338.
- [12] 何海浪. 压电式车辆动态称重传感器的设计与研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
HE Hailang. Design and research of piezoelectric vehicle dynamic load cells[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2016.
- [13] 李宝敏. 高速公路常用动态称重传感器比较[J]. 中国交通信息化, 2017(2): 131-132.
LI Baomin. Comparison of commonly used dynamic load sensors on highways[J]. China Transportation Informatization, 2017(2): 131-132.
- [14] 王荣旭. 基于压电传感器的车辆动态称重系统开发[D]. 济南: 山东大学, 2021.
WANG Rongxu. Development of vehicle dynamic weighing system based on piezoelectric sensors[D].

- Jinan; Shandong University, 2021.
- [15] 赵千. 基于多传感器的路面动态称重系统研究[D]. 北京:北京科技大学, 2020.
ZHAO Qian. Research on road dynamic weighing system based on multi-sensors[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [16] 赵培杰. 基于压电石英传感器的高速动态称重系统设计[D]. 太原:中北大学, 2018.
ZHAO Peijie. Design of high-speed dynamic weighing system based on piezoelectric quartz sensor[D]. Taiyuan: North China University, 2018.
- [17] 沙占友. 智能温度传感器的发展趋势[J]. 电子技术应用, 2002(5): 6-7.
SHA Zhanyou. Development trend of intelligent temperature sensors[J]. Electronic Technology Applications, 2002(5): 6-7.
- [18] 张妍, 苏煜飞. 温度传感器的研究和应用[J]. 现代制造技术与装备, 2016(5): 143-146.
ZHANG Yan, SU Yufei. Research and application of temperature sensors[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(5): 143-146.
- [19] 谢清俊, 罗攀, 程爽. 接触式测温技术综述[J]. 中国仪器仪表, 2017(8): 48-53.
XIE Qingjun, LUO Jiang, CHENG Shuang. Overview of contact temperature measurement technology [J]. China Instrumentation, 2017(8): 48-53.
- [20] HORNY N. FPA camera standardisation [J]. Infrared Physics & Technology, 2003, 44(2): 109-119.
- [21] 储呈敏, 马尚昌, 张素娟, 等. 地表温度测量方法研究综述[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 187-189.
CHU Chengmin, MA Shangchang, ZHANG Sujuan, et al. Review of research on surface temperature measurement methods[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(6): 187-189.
- [22] 刘学琪, 杨万红. 基于红外热像仪的沥青路面温度监控措施[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(6): 102-104.
LIU Xueqi, YANG Wanhong. Asphalt pavement temperature monitoring measures based on infrared thermal imaging camera[J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2016, 12(6): 102-104.
- [23] 朝鲁门. 气象卫星在地表温度反演及应用方面的综述[J]. 内蒙古科技与经济, 2015(10): 60-62.
CHAO Lumen. A review of meteorological satellites in surface temperature retrieval and application [J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2015(10): 60-62.
- [24] 李宁, 黄树青, 顾卫, 等. 红外热像仪在公路小气候监测中的应用[J]. 公路交通科技, 2006(9): 154-158.
LI Ning, HUANG Shuqing, GU Wei, et al. Application of infrared thermal imaging cameras in highway microclimate monitoring [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2006(9): 154-158.
- [25] 李蕊, 牛生杰, 汪玲玲, 等. 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析[J]. 气象, 2011, 37(3): 325-333.
LI Rui, NIU Shengjie, WANG Lingling, et al. Comparative observations of three underlying surface temperatures and analysis of icing meteorological conditions[J]. Meteorology, 2011, 37(3): 325-333.
- [26] 刘冰, 包国涛, 彭凯, 等. 基于 Landsat TM 影像不同地表温度反演算法的比较[J]. 地理信息世界, 2015, 22(3): 57-61.
LIU Bing, BAO Guotao, PENG Kai, et al. Comparison of different surface temperature inversion algorithms based on Landsat TM images[J]. Geographic Information World, 2015, 22(3): 57-61.
- [27] 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 等. 北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3491-3500.
MENG Dan, LI Xiaojuan, GONG Huili, et al. Thermal landscape pattern in Beijing and the thermal environmental effects of typical urban landscapes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(13): 3491-3500.
- [28] 袁旭. 低空航拍近地温度研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
YUAN Xu. Research on near-earth temperature in low-altitude aerial photography[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [29] 冯蕾, 张楷翊, 郜婧婧, 等. 气象卫星遥感陆表温度产品在公路路面温度监测中的应用[J]. 科技导报, 2019, 37(20): 49-64.
FENG Lei, ZHANG Kaiyi, GAO Jingjing, et al. Application of meteorological satellite remote sensing land surface temperature products in highway pavement temperature monitoring [J]. Science and Technology Herald, 2019, 37(20): 49-64.
- [30] 孟瑜, 于兰, 王亚杰, 等. 光纤温度传感器的原理及应用研究[J]. 现代营销(信息版), 2020(5): 60-62.
MENG Yu, YU Lan, WANG Yajie, et al. Research on the principle and application of optical fiber temperature sensors[J]. Modern Marketing (Information Edition), 2020(5): 60-62.
- [31] HY T, LIU S Y, GUAN B, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural and railway applications[C]//

- Advanced Sensor Systems and Applications II. Beijing, China; SPIE, 2005: 85-97.
- [32] MIZUNAMI T, TATEHATA H, KAWASHIMA H, et al. High-sensitivity cryogenic fibre-Bragg-grating temperature sensors using Teflon substrates[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 914.
- [33] 庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- PANG Dandan. Research on new fiber grating sensing technology[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [34] SINGH A K, ZHU Y, HAN M, et al. Simultaneous load and temperature measurement using Lophine-coated fiber Bragg gratings[J]. *Smart Materials & Structures*, 2016, 25(11): 115019.
- [35] JONSSON P. Remote sensor for winter road surface status detection[C]// *Sensors*, 2011 IEEE. Limerick, Ireland: IEEE, 2011: 1285-1288.
- [36] CONSSON J, ROSENDAHL S, SJODAHL M, et al. Road condition analysis using NIR illumination and compensating for surrounding light[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 77: 175-182.
- [37] JONSSON P. Road condition discrimination using weather data and camera images[C]// 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington, USA: IEEE, 2011: 1616-1621.
- [38] JONSSON P. Classification of road conditions: from camera images and weather data[C]// 2011 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA) Proceedings. Ottawa, Canada: IEEE, 2011: 1-6.
- [39] JONSSON P. Surface status classification, utilizing image sensor technology and computer models[D]. Sweden: Mid Sweden University, 2015.
- [40] 张久鹏, 王培, 葛敬勇, 等. 基于红外技术的沥青路面积水结冰厚度测试方法与影响因素[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(6): 1187-1192.
- ZHANG Jiupeng, WANG Pei, GE Jingyong, et al. Testing method and influencing factors of water freezing thickness on asphalt road based on infrared technology[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1187-1192.
- [41] YAMADA M, UEDA K, HORIBA I, et al. Discrimination of the road condition toward understanding of vehicle driving environments[J]. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation System*, 2001, 2(1): 26-31.
- [42] JOKELA M, KUTILA M, LONG L. Road condition monitoring system based on a stereo camera[C]// 2009 IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. Cluj-Napoca, Romania: IEEE, 2009: 423-428.
- [43] COLACE L, SANTONI F, ASSANTO G. A near-infrared optoelectronic approach to detection of road conditions[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 633-636.
- [44] COLACE L, SANTONI F, ASSANTO G. Optical road-ice detector operating in the near infrared[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(5): 338-339.
- [45] ARMAND O, PICCARD I, LORENZ O, et al. Optical detection of dangerous road conditions[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(6): 1360.
- [46] 顾昊, 李勃, 张潇, 等. 基于偏振测量的路面积水结冰检测方法[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(7): 4.
- GU Hao, LI Bo, ZHANG Xiao, et al. Detection method of road water and ice accumulation based on polarization measurement[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, 34(7): 4.
- [47] 苑会珍, 葛俊锋, 叶林, 等. 基于线偏振度的非接触式路面状态探测方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2017(8): 4.
- YUAN Huizhen, GE Junfeng, YE Lin, et al. Non-contact pavement condition detection method based on linear polarization degree[J]. *Instrument Technology and Sensors*, 2017(8): 4.
- [48] 刘红. 路面传感器系统中水膜传感器技术的研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- LIU Hong. Research on water film sensor technology in road sensor system[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [49] 谭涛. 基于微电极水膜传感器的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- TAN Tao. Research on microelectrode water film sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017.
- [50] 王艳. 水膜厚度传感器的可靠性分析与应用[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WANG Yan. Reliability analysis and application of water film thickness sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [51] 李薇, 叶林, 张杰, 等. 光纤式结冰传感器的试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(8): 16-18.
- LI Wei, YE Lin, ZHANG Jie, et al. Experimental study of optical fiber icing sensor[J]. *Journal of Huazhong*

- University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(8): 16-18.
- [52] 但汉成, 刘扬, 凌桂香, 等. 光纤式结冰传感器探测沥青路面结冰过程[J]. 公路交通科技, 2014, 31(4): 7-15.
DAN Hancheng, LIU Yang, LING Guixiang, et al. Detection of icing process on asphalt pavement using optical fiber icing sensor[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2014, 31(4): 7-15.
- [53] 叶林. 基于压电器件的冰传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2001(9): 6-7.
YE Lin. Ice sensor based on piezoelectric devices[J]. Instrument Technology and Sensors, 2001(9): 6-7.
- [54] 张杰, 王敏, 张洪, 等. 谐振平膜型结冰传感器的智能温度补偿[J]. 计量与测试技术, 2005(8): 4-5.
ZHANG Jie, WANG Min, ZHANG Hong, et al. Intelligent temperature compensation of resonant flat film icing sensor[J]. Measurement and Testing Technology, 2005(8): 4-5.
- [55] 谭舒亚. 路面结冰检测技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
TAN Shuya. Research on road ice detection technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [56] 舒俊. 谐振式路面状态传感器研究与试验[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
SHU Jun. Research and experiment on resonant road condition sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [57] OWUSU K P, KUHN D C S, BIBEAU E L. Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: proof of concept [J]. Renewable Energy, 2013, 50: 196-205.
- [58] ARTEMOV V G, VOLKOV A A. Water and ice dielectric spectra scaling at 0 °C [J]. Ferroelectrics, 2014, 466(1): 158-165.
- [59] 崔丽琴. 基于CAV444的电容式冰厚传感器及其检测系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
CUI Liqin. Research on capacitive ice thickness sensor and its detection system based on CAV444 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [60] FELSBERGER R, SCHWEIGHOFER B, FLATSCHER M, et al. Low power ice detection with capacitive and impedance spectroscopy-based measurements[C]//2018 IEEE 27th international symposium on industrial electronics (ISIE). Cairns, Australia: IEEE, 2018: 809-813.
- [61] FLATSCHER M, NEUMAYER M, BRETTERKLEBER T. Field sensor analysis for electrical impedance spectroscopy based ice detection[C]// 2017 IEEE Sensors. Glasgow, UK: IEEE, 2017: 1-3.
- [62] NEUMAYER M, BRETTERKLEBER T, FLATSCHER M, et al. Signal processing for capacitive ice sensing: electrode topology and algorithm design[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1458-1466.
- [63] 郎洪, 陆键, 陈圣迪, 等. 考虑病害三维特征的沥青路面车辙异常检验方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 9.
LANG Hong, LU Jian, CHEN Shengdi, et al. Asphalt pavement rutting abnormality detection method considering three-dimensional characteristics of disease [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 9.
- [64] 陈小宇, 雷波. 一种快速鲁棒的车辙检测方法[J]. 应用科学学报, 2013, 31(5): 512-518.
CHEN Xiaoyu, LEI Bo. A fast and robust rut detection method[J]. Journal of Applied Science, 2013, 31(5): 512-518.
- [65] LUO W, LIU L, LI L. Measuring rutting dimension and lateral position using 3D line scanning laser and inertial measuring unit[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103056.
- [66] 谭忆秋, 肖神清, 熊学堂. 路面抗滑性能检测与预估方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 32-47.
TAN Yiqiu, XIAO Shenqing, XIONG Xuetang. Review of pavement anti-skid performance detection and prediction methods[J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 21(4): 32-47.
- [67] WANG Y, LAI X, ZHOU F, et al. Evaluation of pavement skid resistance using surface three-dimensional texture data[J]. Coatings, 2020, 10(2): 162.
- [68] WANG Y, YU B, ZHANG X, et al. Automatic extraction and evaluation of pavement three-dimensional surface texture using laser scanning technology[J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104410.
- [69] SHI W, NIU D, LI Z, et al. Effective contact texture region aware pavement skid resistance prediction via convolutional neural network[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 39(13): 2054-2070.
- [70] LENG B, JIN D, XIONG L, et al. Estimation of tire-road peak adhesion coefficient for intelligent electric vehicles based on camera and tire dynamics information

- fusion[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107275.
- [71] ZHAO Y Q, LI H Q, LIN F, et al. Estimation of road friction coefficient in different road conditions based on vehicle braking dynamics[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30: 982-990.
- [72] ZHAO W, ZHANG J, LAI J, et al. Skid resistance of cement concrete pavement in highway tunnel: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 406: 133235.
- [73] 高英达. 基于机载激光雷达的路面车辙和平整度检测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
GAO Yingda. Research on road rutting and flatness detection technology based on airborne lidar[D]. Nanjing: South Earth University, 2022.
- [74] HAN J, XIONG G, LIU J. Detection and analysis of pavement sections based on laser displacement sensor [J]. *Sensors*, 2023, 23(15): 6758.
- [75] LI Peigen, HU Guizhang, XIA Haiting, et al. Efficient method based on recurrent neural networks for pavement evenness detection[J]. *Measurement*, 2023, 212: 112676.
- [76] XU J, YU X. Pavement roughness grade recognition based on one-dimensional residual convolutional neural network[J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2271.
- [77] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(11): 29-33.
LIU Deming, SUN Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. *Progress in Lasers and Optoelectronics*, 2009, 46(11): 29-33.
- [78] MA X, WANG T, DONG Z. Dynamic response monitoring and analysis of In-Service asphalt pavement based on FBG measuring technology [C]// *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation: Proceedings of 6th APT Conference*. Sydney, Australia: Springer International Publishing, 2020: 536-544.
- [79] 谭忆秋, 王海朋, 马韶军, 等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面压实监测[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(5): 112-117.
TAN Yiqiu, WANG Haipeng, MA Shaojun, et al. Asphalt pavement compaction monitoring based on fiber grating sensing technology [J]. *Journal of Chinese Highways*, 2014, 27(5): 112-117.
- [80] CAMPANELLA C, CUCCOVILLO A, CAMPANELLA C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3115.
- [81] 张锦龙, 王拥军, 田凤, 等. 光纤传感的后起之秀——分布式传感[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 9(2): 174-178.
ZHANG Jinlong, WANG Yongjun, TIAN Feng, et al. The rising star of optical fiber sensing: distributed sensing[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 9(2): 174-178.
- [82] SUHARTOMO A, SIMATUPANG J W, WIDJAJA B, et al. Feasibility study on structural health monitoring systems using fiber-optic sensors (FOS) technology for transportation infrastructures in Indonesia[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 494: 012054.
- [83] CHAPELEAU X, BLANC J, HORNYCH P, et al. Use of distributed fiber optic sensors to detect damage in a pavement[C]// *Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Nantes, France: Taylor & Francis Group, 2014: 8-11.
- [84] 陈鑫. 季冻区路基冻胀融沉控制指标研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
CHEN Xin. Research on control indicators of frost heave and thaw settlement of roadbed in seasonally frozen areas [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [85] 江涛. 银西高铁甘宁段水泥改良黄土路基冻胀规律及冻胀防治效果评价[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(9): 8-17.
JIANG Tao. Frost heave pattern and frost heave prevention effect evaluation of cement-improved loess subgrade in the ganning section of the Yinxi High-speed Railway[J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(9): 8-17.
- [86] 孙英潮, 闫宏业, 蔡德钧, 等. 高速铁路路基冻胀综合监测体系研究[J]. *铁道建筑*, 2015(6): 92-95.
SUN Yingchao, YAN Hongye, CAI Degou, et al. Research on comprehensive monitoring system for high-speed railway subgrade frost heave [J]. *Railway Construction*, 2015(6): 92-95.
- [87] CAMPANELLA C E, CUCCOVILLO A, CAMPANELLA C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3115.
- [88] OU R, LUO L, SOGA K. Distributed fiber optic strain sensing for crack detection with Brillouin shift spectrum back analysis[J]. *Structural Health Monitoring*, 2024, 23(4): 2636-2649.
- [89] 王博实. 基于FBG的路基不均匀沉降监测传感器应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
WANG Boshi. Research on application of FBG-based

- uneven settlement monitoring sensor for roadbed [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [90] GAO S, ZENG Q, JIAO J, et al. A review on persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(1): 86-94.
- [91] 尼露帕尔·阿迪力. 集成 ESMD 和 STL 的 PS 序列交通基础设施季节性形变监测研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- NILUPAL Adili. Research on seasonal deformation monitoring of PS sequence transportation infrastructure integrating ESMD and STL[D]. Beijing: Beijing Jianzhu University, 2023.
- [92] SUN B C, QIU Y J, LIANG S Q. Cracking recognition of pavement surface based on wavelet technology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(1): 69-72.
- [93] HOANG N D, NGUYEN Q L. Fast local laplacian-based steerable and sobel filters integrated with adaptive boosting classification tree for automatic recognition of asphalt pavement cracks[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 1-17.
- [94] 王博. 基于 MATLAB 图像处理的水泥路面裂缝检测研究[J]. *商洛学院学报*, 2014, 28(4): 42-45.
- WANG Bo. A study on cement pavement crack detection based on MATLAB image processing [J]. *Journal of Shangluo University*, 2014, 28(4): 42-45.
- [95] LI J, YANG Z, LI W. Design and implementation of pavement crack detection system based on FPGA[C]// *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. Qingdao, China: IEEE, 2015: 5936-5941.
- [96] RONGGUI M A, KUN X U, LIU F. Highway surface crack image identifying algorithm[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2014(2): 90-94.
- [97] 刘娜, 宋伟东, 赵泉华. 形态学和最大熵图像分割的城市路面裂缝检测[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(1): 5.
- LIU Na, SONG Weidong, ZHAO Quanhua. Urban pavement crack detection using morphology and maximum entropy image segmentation[J]. *Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 34(1): 5.
- [98] ZHU Qingbo. Pavement crack detection algorithm based on image processing analysis[C]// *2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*. Hangzhou, China: IEEE, 2016, 1: 15-18.
- [99] LI Y Y, HUANG Q Y, HOU Z X. Improve of OSTU based on hough transformation and applied in pavement crack detection[J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, 24(5): 43-46.
- [100] TALAB A, HUANG Z, XI F, et al. Detection crack in image using OTSU method and multiple filtering in image processing techniques [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1030-1033.
- [101] QIU L Y. An algorithm of pavement crack detection based on edge detection [J]. *Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 28(3): 37-43.
- [102] HAN K, HAN H. Pavement crack detection method based on region-level and pixel-level features[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(5): 1178-1186.
- [103] LUO Y Z. Asphalt pavement crack detection based on image local mean standard deviation algorithm[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(12): 167-170.
- [104] BALBIN J R, HORTINELA IV C C, GARCIA R G, et al. Pattern recognition of concrete surface cracks and defects using integrated image processing algorithms [C]// *Second International Workshop on Pattern Recognition*. Singapore: SPIE, 2017, 10443: 40-44.
- [105] 狄亚平. 路面裂缝识别算法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- DI Yaping. Research on pavement crack identification algorithm[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [106] 刘杨. 基于图像处理的路面裂缝检测系统研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2017.
- LIU Yang. Research on pavement crack detection system based on image processing[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2017.
- [107] LI W. Improved gray correction algorithm for preprocessing pavement crack[J]. *Computer Systems & Applications*, 2015, 24(2): 220-223.
- [108] SHUAI L I, HOU D, GAO J, et al. Research on preprocessing method of pavement crack image via mathematical morphology [J]. *Highway Engineering*, 2018, 43(2): 270-274.
- [109] 常磊. 基于时空关联的路网数据分析与交通发展态势预测[D]. 济南: 山东理工大学, 2023.
- CHANG Lei. Road network data analysis and traffic development situation prediction based on spatio-temporal correlation [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2023.

- [110] 舒斯,熊守权,陈英英,等.湖北省高速公路道路结冰预警模型[J].气象,2019,45(11):11.
SHU Si, XIONG Shouquan, CHEN Yingying, et al. Highway icing warning model in Hubei Province [J]. Meteorology, 2019, 45(11): 11.
- [111] 白永清,陈城,何明琼.利用 Logistic 回归方法的高速桥(路)面结冰风险等级预警模型[J].气象科技,2016,44(2):5.
BAI Yongqing, CHEN Cheng, HE Mingqiong. High-speed bridge (road) surface icing risk level early warning model using logistic regression method [J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(2): 5.
- [112] HOANG N D, NGUYEN Q L. Automatic recognition of asphalt pavement cracks based on image processing and machine learning approaches; a comparative study on classifier performance[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018(1): 6290498.
- [113] MEGAN R, MICHAELI P, HARRY T. Using support vector machines to predict the probability of pavement failure [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport, 2015, 168(3): 212-222.
- [114] 董天翔.江苏省高速路网道路低温时空分布及预警模型对比研究[D].南京:南京信息工程大学,2018.
DONG Tianxiang. Comparative study on the spatial and temporal distribution of low temperature and early warning models on Jiangsu Province's highway network [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018.
- [115] 刘建华.基于最小二乘支持向量机的机场道面积冰厚度预测[D].天津:中国民航大学,2020.
LIU Jianhua. Prediction of airport runway ice thickness based on least squares support vector machine [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [116] CORTES C, MOHRI M, ROSTAMIZADEH A. Generalization bounds for learning kernels [C]//27th International Conference on Machine Learning. Haifa, Israel: ICML, 2010: 247-254.
- [117] 季天剑,黄晓明,刘清泉,等.沥青路面表面水膜厚度试验[J].公路交通科技,2004(12):14-17.
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Test of water film thickness on asphalt pavement surface [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2004(12): 14-17.
- [118] 季天剑,黄晓明,刘清泉,等.道路表面水膜厚度预测模型[J].交通运输工程学报,2004(3):1-3.
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan, et al. Prediction model of water film thickness on road surface [J]. Journal of Transportation Engineering, 2004(3): 1-3.
- [119] 翟登攀,张熙颖.基于 BP 神经网络的道路预防性养护决策研究[J].交通科技与经济,2020,22(5):63-66.
ZHAI Dengpan, ZHANG Xiyong. Research on road preventive maintenance decision-making based on BP neural network [J]. Transportation Science and Technology and Economics, 2020, 22(5): 63-66.
- [120] KIM Y, MALLICK R, BHOWMICK S, et al. Nonlinear system identification of large-scale smart pavement systems [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(9): 3551-3560.
- [121] 赵丽平,贺洁颖,于小红,等.山西省冬季降水与高速公路路面结冰预报技术研究[C]//第34届中国气象学会年会 S7 水文气象、地质灾害气象预报理论与应用技术论文集.郑州,中国:中国气象出版社,2017:6.
ZHAO Liping, HE Jieying, YU Xiaohong, et al. Research on winter precipitation and highway pavement icing forecasting technology [C]//34th China Meteorological Society Annual Meeting S7 Hydrology Meteorology, Geological Disaster Meteorology Forecasting Theory and Application Technology Paper Collection. Zhengzhou, China: China Meteorological Press, 2017:6.
- [122] 陈凯,徐国庆,熊焱,等.基于 C4.5 决策树算法的道路结冰预报模型构建与应用[J].交通运输研究,2018,4(1):57-62.
CHEN Kai, XU Guoqing, XIONG Tao, et al. Construction and application of road icing prediction model based on C4.5 decision tree algorithm [J]. Transportation Research, 2018, 4(1): 57-62.
- [123] 武万里,蔡晓辉,刘垚.基于 GIS 的高速公路道路结冰风险分析与评价[J].华北自然资源,2021(2):134-136.
WU Wanli, GOU Xiaohui, LIU Yao. Analysis and evaluation of highway icing risk based on GIS [J]. North China Natural Resources, 2021(2): 134-136.
- [124] 汤筠筠,郭忠印,李长城,等.基于路面摩擦因数的冬季典型路面状态识别模型[J].中国公路学报,2014,27(11):25-30.
TANG Yunyun, GUO Zhongyin, LI Changcheng, et al. Identification model of typical road conditions in winter based on pavement friction factors [J]. Journal of Chinese Highways, 2014, 27(11): 25-30.
- [125] JIA L. The Extraction method of pavement crack edge based on automatic threshold detection and edge connection [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2015(5): 21-24.
- [126] QI Huaichao, XIAO Fei, BAO Xiongwei. Improvement of edge detection discontinuity in pavement crack recognition [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(1): 32-34.
- [127] XU A H, GAO J. Crack identification method for cement pavement based on image enhancement and

- mathematical morphology [J]. Highway, 2015, 25 (10): 55-58.
- [128] 王盼盼. 基于改进灰度分割算法的路面裂缝识别研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG Panpan. Research on pavement crack identification based on improved grayscale segmentation algorithm[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [129] ZHANG H, MENG H, LIU T Z. Analysis on the image edge detection algorithm of asphalt pavement crack[J]. Northern Communications, 2015(3): 56-59.
- [130] XIN W, FENG D, LI W. Research & implementation of pavement crack detection algorithm[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2017, 27(5): 9-10.
- [131] SHENG L. Method of shadow pavement crack extraction based on improved local threshold segmentation[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(20): 112-113.
- [132] HUAN X U, ZHEN-BI L I, JIANG Y Y, et al. Pavement crack detection based on OpenCV and improvedcanny operator[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 4254-4258.
- [133] 张红. 基于图像处理的路面裂缝检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- ZHANG Hong. Research on pavement crack detection system based on image processing[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [134] HOANG N D, NGUYEN Q L, TIEN B D. Image processing-based classification of asphalt pavement cracks using support vector machine optimized by artificial bee colony[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(5): 04018037.
- [135] PAN Y, ZHANG X, CERVONE G, et al. Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral imagery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11 (10): 3701-3712.
- [136] NAGAHARA H, UMEDA K, YAMASHITA A, et al. A method based on machine learning using hand-crafted features for crack detection from asphalt pavement surface images[C]//Thirteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2017. Tokyo, Japan: SPIE, 2017, 10338: 117-124.
- [137] BANHARNSAKUN A. Hybrid ABC ANN for pavement surface distress detection and classification [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2017, 8(2): 699-710.
- [138] HAFEZ M, KSAIBATI K, ATADERO R A. Optimizing expert-based decision-making of pavement maintenance using artificial neural networks with pattern recognition algorithms[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(11): 90-100.
- [139] YAO S, ZHAO Y, ZHANG A, et al. Deep learning for the internet of things [J]. Computer, 2018, 51 (5): 32-41.
- [140] BUTT F A, CHATTHA J N, AHMAD J, et al. On theintegration of enabling wireless technologies and sensor fusion for next-generation connected and autonomous vehicles [J]. IEEE Access, 2022, 10: 14643-14668.
- [141] GHAHRAMANI Z. Probabilistic machine learning and artificial intelligence[J]. Nature, 2015, 521 (7553): 452-459.
- [142] RAFIEI M H, ADELI H. A novel unsupervised deep learning model for global and local health condition assessment of structures [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 598-607.
- [143] HYUN K, TOK A, RITCHIE S G. Long distance truck tracking from advanced point detectors using a selective weighted Bayesian model[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 82: 24-42.
- [144] ZHAO L, LI F, SUN D, et al. Highway traffic crash risk prediction method considering temporal correlation characteristics[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 2023(1): 9695433.
- [145] GRANDE Z, CASTILLO E, MORA E, et al. Highway androad probabilistic safety assessment based on Bayesian network models [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32 (5): 379-396.
- [146] ZOU H, ZHU S, JIANG R, et al. Traffic conflicts in the lane-switching sections at highway reconstruction zones [J]. Journal of Safety Research, 2022, 84: 280-289.
- [147] SONG Y, DENG Y. A new method to measure the divergence in evidential sensor data fusion[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(4): 1550147719841295.
- [148] LI H, BAO Y, OU J. Structural damage identification based on integration of information fusion and shannon entropy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(6): 1427-1440.
- [149] TORRES BLANC C, CUBILLO S, HERNANDEZ

- VARELA P. New negations on the membership functions of type-2 fuzzy sets[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 27(7): 1397-1406.
- [150] SHUANGHU Q, YUNSHENG F, GUOFENG W, et al. Multi sensor data fusion method based on improved evidence theory [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1142.
- [151] WANG P W, YU H B, XIAO L, et al. Online traffic condition evaluation method for connected vehicles based on multisource data fusion[J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(1): 7248189.
- [152] FERNANDO C G, CORNEJO M E, JESUS M. Decision making in fuzzy rough set theory[J]. *Mathematics*, 2023, 11(19): 4187.
- [153] YING C, JIUHONG Z, YANFENG L, et al. Analysis of bridge health detection based on data fusion [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 6893160.
- [154] ALBERT B, ANTHONY S, NANA KENA F, et al. Predictive maintenance model based on multisensor data fusion of hybrid fuzzy rough set theory feature selection and stacked ensemble for fault classification[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1): 4372567.
- [155] ZHANG P, LI T, WANG G, et al. Multi source information fusion based on rough set theory: a review [J]. *Information Fusion*, 2020, 68: 85-117.
- [156] BERGENSTRAHLE L, HE B, BERGENSTRAHLE J, et al. Super-resolved spatial transcriptomics by deep data fusion[J]. *Nature Biotechnology*, 2022, 40(4): 476-479.
- [157] ZHANG L, WANG Z, QU C, et al. Research on hybrid fusion algorithm for multi-feature among heterogeneous image[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103110.
- [158] DOWNEY A, UBERTINI F, LAFLAMME S. Algorithm for damage detection in wind turbine blades using a hybrid dense sensor network with feature level data fusion [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 168: 288-296.
- [159] XUE W A, SSA B, HAI H B, et al. Characterization of particle movement insuperpave gyratory compactor at meso-scale using SmartRock sensors-ScienceDirect [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 206-214.
- [160] DA N H C, YANG D, LIU X, et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118592.
- [161] BOGUE R. Energy harvesting and wireless sensors: a review of recent developments [J]. *Sensor Review*, 2013, 29(3): 194-199.
- [162] LAJNEF N, RHIMI M, CHATTI K, et al. Toward an integrated smart sensing system and data interpretation techniques for pavement fatigue monitoring[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2011, 26(7): 513-523.
- [163] ALAVI A H, HASNI H, LAJNEF N, et al. Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 114: 719-736.
- [164] YUE H, LINBING W, DAWEI W, et al. A preliminary study on the IoT-based pavement monitoring platform based on the Piezoelectric-cantilever-beam powered sensor[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017(1): 4576026.
- [165] YU X B, ZHANG B, TAO J, et al. Smart pavement sensor based on thermoelectricity power [J]. *Proc Spie*, 2010, 7647: 305-312.
- [166] 刘青, 刘滨, 王冠, 等. 数字孪生的模型、问题与进展研究[J]. *河北科技大学学报*, 2019, 40(1): 68-78. LIU Qing, LIU Bin, WANG Guan, et al. Research on models, issues and progress of digital twins[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2019, 40(1): 68-78.
- [167] CERRONE A, HOCHHALTER J, HEBER G, et al. On the effects of modeling as-manufactured geometry: toward digital twin [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 2014(1): 439278.
- [168] MARAI O E, TALEB T, SONG J S. Roads infrastructure digital twin: a step toward smarter cities realization [J]. *IEEE Network*, 2020, 35(2): 136-143.

(编辑:郭少华)